



Mikko Vilenius

Valimohiekan tekniset ominaisuudet ja uusiokäyttö maarakentamisessa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 4.10.2019

Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu

Ohjaaja: TkT Yinning Zhang ja DI Tommi Sappinen

Tekijä Mikko Vilenius

Työn nimi Valimohiekan tekniset ominaisuudet ja uusiokäyttö maarakentamisessa

Maisteriohjelma Master's Programme in Geoengineering

Koodi ENG23

Työn valvoja Professori Leena Korkiala-Tanttu

Työn ohjaaja(t) TkT Yinning Zhang ja DI Tommi Sappinen

Päivämäärä 4.10.2019

Sivumäärä 71 + 33

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Viime vuosina voimaan astuneet lakimuutokset ovat haastaneet Suomen valimoteollisuutta selvittämään uusia toimintamalleja ja käyttökohteita jätteeksi luokiteltujen sivuvirtojen loppusijoittamiseksi. Loppusijoittaminen määräaikaisten ympäristölupien varaisille maakaatopaikoille on tullut tiensä päähän ja samanaikaisesti rakentamista koskeva lainsäädäntö alkanut huomioimaan yhä enemmän uusiomateriaaleja sallimalla niiden käyttöä. Valtioneuvoston vuonna 2018 voimaan astunut asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017 sallii valimohiekkojen käyttämisen väylä- ja kenttärakenteissa sekä teollisuus- ja varastorakennusten pohjarakenteissa ilmoitusmenettelyllä.

Tämä diplomityö on osa ”Kiertovalu” tutkimushanketta, jonka tavoitteena on valimoiden jätteiden hallinta ja sivuvirtojen tuotteistaminen. Pää tavoitteet tämän diplomityön tutkimukselle ovat valimohiekkojen teknisten ominaisuuksien selvittäminen laboratoriokokein ja analysoida koetulosten perusteella soveltuvuutta tien päällysrakenteen suodatinkerrokseen rakeisena materiaalina sekä sideaineella sidottuna kantavaan kerrokseen.

Työssä on katsaus Suomessa ja kansainvälisesti aiemmin tehtyihin tutkimuksiin valimohiekkojen uusiokäyttöön liittyen tie- ja katurakenteissa ja penkereissä, kaatopaikkarakenteissa ja muissa uusiokäyttökohteissa. Materiaaleina tutkimuksessa käytettiin käytetyn valimohiekan lisäksi kivituhkaa ja kalliomursketta sekä sideaineina pikasementtiä, kivihiilen polton lentotuhkaa, Ecolan uusiosideainetta ja biotuhkaa. Rakeiselle valimohiekalle määritettiin rakeisuus, maksimikuivairtotehiys ja optimivesipitoisuus parannetulla proctor-kokeella, kiintotehiys, vedenimukyky, pH-arvo, kapillaarinen vedenimeytyminen, vedenläpäisevyys, hehkutushäviö, huokosluku, kitkakulma ja koheesio rasialeikkauskokeella sekä routanousukoe. Sideaineilla sidottuja valimohiekkaseoksia valmistettiin kolmea eri seostyyppiä: sideaineilla sidotut valimohiekkaseokset, pikasementillä sidotut valimohiekan ja kivituhkan seokset sekä sideaineilla sidotut valimohiekan ja kalliomurskeen seokset. Kaikille sidotuille valimohiekkaseoksille määritettiin yksiaksiaalisella puristuslujuuskokeella puristuslujuuskestävyys ja sideaineilla sidotuille valimohiekan ja kalliomurskeen seoksille pH-arvot. Lisäksi määritettiin tutkimuksessa käytettyjen sideaineiden taivutusveto- ja puristuslujuudet sekä pH-arvot.

Tämän diplomityön tutkimustulosten perusteella tutkittu valimohiekka on soveltuva materiaali tien päällysrakenteen suodatinkerrokseen rakeisena materiaalina. Sideaineilla sidotuista seoksista ainoastaan valimohiekan ja kalliomurskeen seokset saavuttivat kanta-alle kerrokselle laatuvaatimuksissa annetut puristuslujuuden tavoitearvot.

Avainsanat valimohiekka, uusiomateriaalit, päällysrakenne, suodatinkerros, kantava kerros

Author Mikko Vilenius

Title of thesis Technical properties of waste foundry sand and its use in earth construction

Master programme Master's Programme in Geoengineering

Code ENG23

Thesis supervisor Professor Leena Korkiala-Tanttu

Thesis advisor(s) Ph.D. (Tech.) Yinning Zhang and M.Sc. (Tech.) Tommi Sappinen

Date 4.10.2019

Pages 71 + 33

Language Suomi

Abstract

Finnish foundry industry has been challenged to rethink new ways to handle secondary material flows from foundry processes. Secondary flows from foundries have been conventionally disposed to industrial landfills as restwaste, but recent changes in legislation prohibit foundries applying extensions to environmental permits for industrial landfills. However, legislation concerning construction business has become more permissive on the utilization of secondary flows from industries in general. At the beginning of 2018, waste foundry sand was included in Finnish regulation concerning the use of secondary products and waste materials in earth construction.

This thesis is part of national "Kiertovalu" research program, where focus is to improve foundry waste management and productise secondary flows. The main focus of this thesis study is to determine technical properties of foundry sand by laboratory tests and evaluate applicability in earth construction, especially in road pavement where high technical quality is required. Both unbound and bound waste foundry sand are evaluated for applications in filter layer and base layer respectively.

Earlier research studies done in Finland and internationally about waste foundry sand applications in roadway and embankment construction, landfill construction and other applications are discussed in literature review. In addition to waste foundry sand, materials used in this research are quarry fines and crushed rock together with binders: cement, coal ash, Ecolan stabilizer and bioash. Following laboratory tests were carried out to unbound waste foundry sand: gradation, maximum dry density and optimum water content by modified proctor test, specific gravity, water absorption, pH, capillary rise, water permeability, loss on ignition, void ratio, friction angle and cohesion, and frost heave test. Three different bound waste foundry sand mixtures were prepared: waste foundry sand stabilized with binders, waste foundry sand and quarry fines stabilized with cement, and waste foundry sand and crushed rock stabilized with binders. Unconfined compressive strength test was performed to all bound mixtures and determination of pH for mixtures with waste foundry sand and crushed rock with binders. Additionally, flexural and compressive strength were tested plus determination of pH for all binders.

In conclusion, results obtained from the laboratory tests for unbound waste foundry sand confirm that it is technically suitable material for filter layer in pavement structure. Compressive strengths of bound mixtures indicate that only waste foundry sand and crushed rock together with binders fulfills the set requirement for bound base layers in national guideline.

Keywords waste foundry sand, recycled materials, pavement, filter layer, base layer

Alkusanat

Materiaalien kierrättäminen ja erityisesti uusiokäyttö rakentamisessa on ollut mielenkiinnonkohteeni jo jonkin aikaa. Rakentaminen ja rakennusmateriaalien jalostus perinteisesti perustuu neitseellisten luonnonvarojen käyttöön. Alati muuttuvassa ja kehittyvässä maailmassa samanaikaisesti tärkeää on kuitenkin myös huolehtia jätteiden ja sivuvirtojen huolellisesta loppusijoittamisesta, elinympäristöä ja luontoa kunnioittaen. Jotta ihmiskunnan kehitys on kestäväällä pohjalla, ihmisen on myös varjeltava ympäristöä viljelemisen lisäksi. Näiden ajatusten saattamana, diplomityön aihe valikoitui kuin tilauksesta kohdalleni, josta olen hyvin kiitollinen.

Tämän diplomityön tutkimus on osana laajempaa "Kiertovalu" tutkimushanketta, jonka päätoimijana ja koordinaattorina toimii Aalto-yliopisto. Yhteishankkeeseen osallistuu ja sitä rahoittaa Business Finland sekä useampi suomalainen valimoalan yritys. Diplomityön tutkimus toteutettiin Aalto-yliopistossa Pohjarakennus- ja Maamekaniikan sekä Rakenustekniikan laboratorioissa.

Tahdon ensiksi kiittää työn ohjaajia Yinning Zhangia ja Tommi Sappista sekä työn valvojaa, professori Leena Korkiala-Tanttua jatkuvasta valmiudesta olla vastaamassa lukuihin kysymyksiini työn edetessä. Aalto-yliopiston henkilökuntaa haluan kiittää loputtomista neuvoista, avusta sekä työtiloista ja tutkimuslaitteista.

Lisäksi haluan kiittää vanhempiani, sisaruksiani sekä ystäviäni kannustavasta tuesta, rinnalla kulkemisesta ja muistuttamisesta, että elämään mahtuu paljon muutakin kuin opiskelu.

Viimeisenä, mutta ei vähäisimpänä, kaikki kiitos ja ylistys Jumalalle, taivaan ja maan luojalle, elämän lahjasta ja mahdollisuudesta opiskella.

”Viisauden alkukohta on: hanki viisautta ja kaikella, mitä omistat, hanki ymmärrystä.”
Sananlaskut 4:7

Helsingissä 4.10.2019



Mikko Vilenius

Sisällysluettelo

| | |
|--|----|
| Tiivistelmä | |
| Abstract | |
| Alkusanat | |
| Sisällysluettelo..... | 1 |
| Merkinnät | 3 |
| Lyhenteet..... | 4 |
| 1 Johdanto..... | 5 |
| 2 Valimohiekkatyypit ja lyhyesti valimoteollisuudesta | 6 |
| 2.1 Yleistä hiekkamuotin valmistuksesta..... | 6 |
| 2.2 Valimoteollisuuden sisäinen hiekan kierrätys..... | 7 |
| 2.3 Valimohiekkatyypit | 7 |
| 2.3.1 Esterikovetteinen fenolihartsihiekka | 7 |
| 2.3.2 Tuorehiekka..... | 8 |
| 2.3.3 Furaanihartsihiekka..... | 10 |
| 2.4 Valimohiekkojen synty ja määrät..... | 11 |
| 3 Valimohiekkojen uudelleenkäyttökohteet ja niille tehdyt tutkimukset..... | 12 |
| 3.1 Tie- ja katurakenteet ja penkereet..... | 12 |
| 3.2 Kaatopaikkarakenteet..... | 16 |
| 3.3 Muut uusiokäyttökohteet..... | 18 |
| 4 Tutkimuksessa käytetyt materiaalit..... | 20 |
| 4.1 Valimohiekka WFS/WFSR..... | 20 |
| 4.1.1 Kuivairtoteiäisy ja optimivesipitoisuus | 21 |
| 4.1.2 Rakeisuus | 21 |
| 4.2 Kivituhka KaM 0/4..... | 23 |
| 4.2.1 Kuivairtoteiäisy ja optimivesipitoisuus | 23 |
| 4.2.2 Rakeisuus | 23 |
| 4.3 Kalliomurske KaM 0/20..... | 25 |
| 4.3.1 Kuivairtoteiäisy ja optimivesipitoisuus | 25 |
| 4.3.2 Rakeisuus | 25 |
| 4.4 Sideaineet | 26 |
| 4.4.1 Pikasementti CEM I..... | 26 |
| 4.4.2 Kivihiilen polton lentotuhka | 27 |
| 4.4.3 Ecolan Oy:n uusiosideaine | 29 |
| 4.4.4 Biopolton lentotuhka | 30 |
| 5 Laboratoriokokeet valimohiekalke WFS | 31 |
| 5.1 Kiintoteiäisy | 31 |
| 5.2 Vedenimukyky | 31 |
| 5.3 pH-arvo | 32 |
| 5.4 Kapillaarinen vedenimeytyminen..... | 33 |
| 5.5 Vedenläpäisevyys | 34 |
| 5.6 Hehikutushäviö..... | 36 |
| 5.7 Huokoslulun minimi ja maksimi | 37 |
| 5.8 Rasialeikkauskoe | 39 |
| 5.9 Routanousukoe | 40 |
| 6 Laboratoriokokeet sidotulle valimohiekalke WFS | 42 |
| 6.1 Koekappaleiden valmistus, tiivistäminen ja säilytys | 42 |
| 6.2 Puristuslujuuskoe..... | 46 |
| 6.2.1 Valimohiekka WFS/WFSR + sideaine tulokset..... | 47 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.2.2 | Valimohiekka WFS + KaM 0/4 + pikasementti tulokset..... | 49 |
| 6.2.3 | Valimohiekka WFS + KaM 0/20 + sideaine tulokset..... | 50 |
| 6.3 | pH-arvo sidotuille seoksille..... | 51 |
| 6.4 | Sideaineiden taivutus- ja puristuskestävyys..... | 53 |
| 6.5 | pH-arvo sideaineille..... | 57 |
| 7 | Tulosten analyysi | 58 |
| 7.1 | Valimohiekan WFS soveltuvuus suodatinkerrokseen | 58 |
| 7.2 | Valimohiekan WFS soveltuvuus kantavaan kerrokseen sidottuna..... | 61 |
| 8 | Johtopäätökset..... | 65 |
| | Lähdeluettelo | 66 |
| | Liiteluettelo | 71 |
| | Liitteet | |

Merkinnät

| | | |
|------------------|-----------------------|--|
| A | [cm ²] | Vedenläpäisevyyskokeen näytteen pinta-ala |
| C | [kPa] | Koheesio |
| C _C | | Kaarevuussuhde (coefficient of curvature) |
| C _U | | Raekokosuhte (coefficient of uniformity) |
| e | | Huokosluku |
| H | [m] | Vedenläpäisevyyskokeen mittaputkien veden korkeusero |
| H _h | [%] | Hehkutushäviö |
| h _c | [m] | Kapillaarinen nousukorkeus |
| k | [m/s] | Vedenläpäisevyyskerroin |
| k ₁₀ | [m/s] | Lämpötilakorjattu vedenläpäisevyyskerroin |
| l | [m] | Vedenläpäisevyyskoelaitteiston virtauspolku |
| n | [%] | Huokoisuus |
| p-% | [%] | Painoprosentti |
| pH | | Happamuuden tai emäksisyyden voimakkuus |
| Q | [m ³ /s] | Virtaama |
| R _c | [kPa] | Puristuslujuus (sideaineprisma) |
| R _f | [kPa] | Taivutusvetolujuus (sideaineprisma) |
| SP | [mm ² /Kh] | Routimiskerroin |
| T | [° C] | Vedenläpäisevyyskokeen näytteen lämpötila |
| V | [m ³] | Maaerän kokonaistilavuus (huokosluvun minimi ja maksimi) |
| V _h | [m ³] | Maaerän huokostilavuus (huokosluvun minimi ja maksimi) |
| W _h | [g] | Hehkutusastian ja näytteen paino hehkutettuna |
| W _k | [g] | Hehkutusastian ja näytteen paino kuivana |
| W _t | [g] | Hehkutusastian paino |
| WA ₁ | [%] | Vedenimukyky yhden tunnin upotuksen jälkeen |
| w | [%] | Tavoite vesipitoisuus näytteessä |
| w _{FI} | [%] | Vesipitoisuus näytteessä |
| w _{OPT} | [%] | Optimivesipitoisuus |
| α | | Vedenläpäisevyyden lämpötilakorjauskerroin |
| Δt | [s] | Vedenläpäisevyyskokeen näytteen keräyksen aikaväli |
| ΔV | [m ³] | Kerätyn veden määrä vedenläpäisevyyskokeessa |
| ε | | Muodonmuutos (strain) |
| ρ _d | [g/cm ³] | Kuivairtoilavuus |
| ρ _s | [g/cm ³] | Kiintotiheys |
| σ | [MPa] | Puristuslujuus |
| φ | [°] | Kitkakulma |

Lyhenteet

| | |
|----------------|--|
| BPLT | Biopolton lentotuhka |
| BPLTA / BPLT+A | Biopolton lentotuhka sisältäen aktivaattorin (sementti) |
| CEM | Pikaseementti CEM I 52,5 R |
| cSa | Karkea hiekka |
| fSa | Hieno hiekka |
| ECO | Ecolan uusiosideaine |
| InfraRYL | Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset |
| KaM 0/4 | Kivituhka rakeisuusjakaumalla 0 mm – 4 mm |
| KaM 0/20 | Kalliomurske rakeisuusjakaumalla 0 mm – 20 mm |
| KC50 | Kalkkiseementti KC50 |
| KPLT | Kivihiilen polton lentotuhka |
| KPLTA / KPLT+A | Kivihiilen polton lentotuhka sisältäen aktivaattorin (sementti) |
| mSa | Keskikarkea hiekka |
| TKK | Teknillinen korkeakoulu |
| Vrk | Vuorokausi |
| WFS | Valimokierrosta poistettu hiekka (<u>W</u> aste <u>F</u> oundry <u>S</u> and) |
| WFSR | Elvytetty valimohiekka (<u>W</u> aste <u>F</u> oundry <u>S</u> and <u>R</u> eclaimed) |

1 Johdanto

Valimoalan suurin ongelma on ollut jo pitkään kertakäyttöisistä hiekkamuoteista syntyvien, jätteeksi luokiteltujen sivutuotteiden: valimohiekkojen, -pölyjen ja kuonien loppusijoitus. Tavanomaisesti hiekkavalimot ovat sijoittaneet sivutuotteet teollisille, ympäristöluvan varaisille maakaatopaikoille. Vuonna 2013 voimaan astunut valtioneuvoston asetus kaatopaikoista 331/2013 (Ympäristöministeriö 2013), joka kieltää valimojätteiden loppusijoituksen orgaanisen jätteen kaatopaikoille, on haastanut valimoteollisuutta pohdimaan vaihtoehtoisia uusiokäyttökohteita valimoprosessin sivutuotteille. Valtioneuvoston alkuvuodesta 2018 voimaan astunut asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017 (Valtioneuvosto 2017), sallii valimohiekan käyttämisen väylä- ja kenttärakenteissa sekä teollisuus- ja varastorakennusten pohjarakenteissa ilmoitusmenettelyllä, ympäristöluvan sijaan, mikäli sen kemialliset ominaisuudet ja käyttömäärät ovat asetuksessa määrättyjen raja-arvojen rajoissa.

Tämä diplomityö on toteutettu osana ”Kiertovalu” nimistä tutkimushanketta, jonka tavoitteena on valimoiden kilpailukyvyn parantaminen ympäristötietoisuuden, kiertotalousmalliin pohjautuvien toimintatapojen ja teollisen symbioosin kehittämisen kautta, vastaten muuttuneeseen lainsäädäntöön koskien valimoiden sivutuotteita ja loppusijoitusta. Ympäristötietoisuus ja vihreiden valintojen tekeminen teollisessa tuotantoketjussa on itsessään kilpailukykyä kohentava tekijä. Valimotuotteiden alihankkijat ja loppukäyttäjät arvottavat kustannusten lisäksi tuotantoketjun ekologista kestävyyttä. Kiertotaloutteen ja teolliseen symbioosiin pohjautuvassa tuotannossa, käytettävien raaka-aineiden ja materiaalien käytön suunnittelu yhä uudelleen sekä sivutuotteiden tai jätteiden valjastaminen toisen teollisuuden toimijan raaka-aineeksi on ajattelun ja toimintatavan muutos. Muutoksen avulla voidaan täyttää lainsäädännölliset määräykset ja tuottaa ympäristöä entistä enemmän huomioivia valimoteollisuuden tuotteita, hyödyttäen samalla muita teollisuuden toimijoita. (Sappinen 2018b.)

Tämän diplomityön tavoitteena on ollut selvittää, tutkia ja todentaa jätteeksi luokitellun valimohiekan teknistä kelpoisuutta maarakentamiskohteisiin uusiomateriaalina ja erityisesti tienrakennukseen, jossa materiaaleille kohdennetaan korkeat laatuvaatimukset. Nykyisellään valimohiekka on teknisesti soveltuva maarakenteissa infrarakentamisen yleisten laatuvaatimusten mukaan väylärakenteiden suodatinkerrokseen, maapenkereisiin ja kaatopaikkojen eristerakenteisiin. Tässä tutkimuksessa varmennetaan valimohiekan soveltuvuus suodatinkerrokseen väylärakenteeseen laboratoriokokein ja tutkitaan soveltuvuutta tierakenteessa kantavaan kerrokseen eri sideaineilla sidottuna puristuslujuuskokein.

Työn sisältö koostuu kirjallisuusosioista luvuissa 2 ja 3, joissa on katsaus hiekkavalimoteollisuuteen, sen sisäisiin prosesseihin ja valimohiekkoihin, ja lisäksi valimohiekan uusiokäyttökohteisiin ja niille tehtyihin tutkimuksiin. Työn tutkimusosioissa luvuissa 4, 5 ja 6 on selitettynä valimohiekan lisäksi tutkimuksessa käytettyjen muiden materiaalien tietoja, sitomattomalle rakeiselle valimohiekalle tehtyjä laboratoriokokeita sekä sideaineella sidotulle valimohiekalle tehtyjä kokeita ja valmistukseen liittyviä teknisiä asioita. Lopuksi luvussa 7 keskitytään tulosten analyysiin ja luvussa 8 summattuna johtopäätökset. Työssä käsitellään valimoteollisuuden sivutuotteista ainoastaan valimohiekkaa rakennusteknisestä näkökulmasta ja sen kemiallinen ja mineraloginen analyysi on rajattu pois tutkimuksesta.

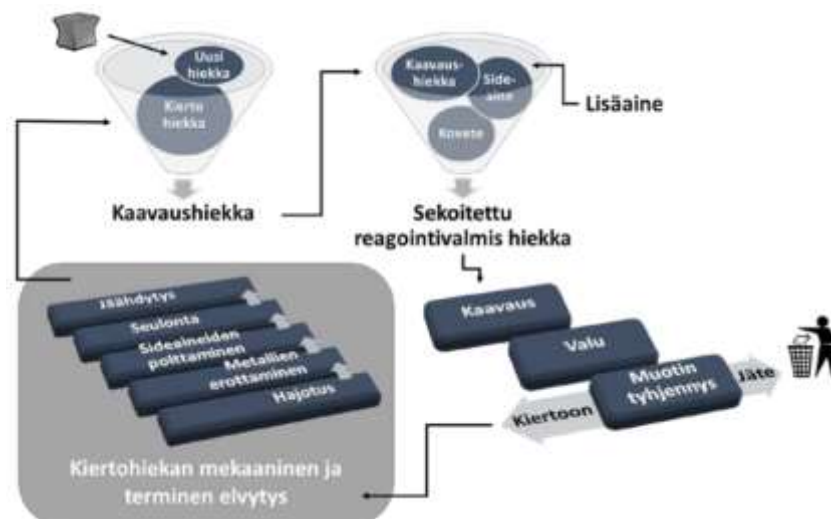
2 Valimohiekkatyypit ja lyhyesti valimoteollisuudesta

Tämän luvun alla käsitellään kiteytetystä hiekkamuotin valmistusprosessi, valimoteollisuuden sisäinen ja ulkoinen hiekkankierrätys (reklamointi), keskeisimmät valimoteollisuudessa käytetyt valimohiekkatyypit sekä katsaus valimohiekkojen syntymääriin Suomessa.

2.1 Yleistä hiekkamuotin valmistuksesta

Valimohiekka, jota kutsutaan myös nimellä kaavaushiekka, on valimoteollisuudessa hiekkavalimon muotinvalmistuksessa käytettävä materiaali, joka käsittää runkoaineena (kutsutaan raeainekseksi) neutraalin puhtaan kvartsihiekan tai kromiittihiekan, epäorgaanisen tai orgaanisen sideaineen, kovetteen ja mahdollisen lisäaineen. Kvartsihiekillä on korkea sulamislämpötila ja tämän vuoksi se soveltuu muottihiekkaksi kierrätettävyytensä puolesta erinomaisesti kestäen suuria lämpötilavaihteluja. Kromiittihiekkaa käytetään lisäksi teräsvalimoissa, kun valukappaleiden pinnanlaatua ja puhdistettavuutta halutaan parantaa. Kromiittihiekan kestävyys lämpötilavaihtelusykliä kierrätettävyyden näkökulmasta valimolinjastolla on huonompi kuin kvartsihiekillä. Sideaineet ovat joko jauhemaisia (bentoniitti) tai nestemäisiä (hartsit). Lisäaineita ovat muun muassa kivihiili-jauhe ja rautaoksidi, joiden avulla valupinnan laatua voidaan parantaa. (Meskanen & Höök 2015a, s.27.)

Muotinvalmistusprosessia kutsutaan nimellä kaavaus. Valuprosessissa valimohiekasta valmistettu muotti on kertakäyttöinen ja menetelmää kutsutaankin kertamuottimenetelmäksi. Sideaineen, kovetteen ja tarvittaessa lisäaineiden avulla kvartsihiekkasta saadaan nopeasti sitoutumaan, pysymään suunnitellussa muodossa valuprosessin ajan ja kestävästi metallin valamisen korkeaa lämpötilaa muuttamatta muotoaan merkittävästi. Tavanomaisesti muotti sisältää hiekkamuotin ja keernan. Keernan avulla valettavaan kappaleeseen voidaan muodostaa reikiä ja onkaloita. Valetun metallikappaleen kovettuttua ja lämpötilan jäähtyttyä, muotti rikotaan ja valukappale irrotetaan muotista jatkojalostusta varten valimoprosessissa. Rikottu muotti johdetaan valimoprosessissa tämän jälkeen murskaimelle, joka hienontaa hiekan alkuperäisen tasarakkeiseksi ja lopuksi hiekka seulotaan. Osa murskatusta hiekasta kierrätetään takaisin valimolinjaston muottikiertoon (kierrätys valimoprosessissa sisäisesti) ja osa loppusijoitetaan pois valimolinjastolta. Alapuolella olevassa kuvassa (Kuva 1) nähtävissä valimoprosessi. (Meskanen & Höök 2015a, s.27.)



Kuva 1. Hiekkankierto valimoprosessissa. (Meskanen & Höök 2015b, s.2.)

Tavanomaisen, yleisimmin käytetyn valimohiekan raearaekoko on 0,32 mm ja toiseksi eniten käytetyn 0,25 mm (Aalto-yliopisto 2018). Nykyisellään valimohiekkaseoksessa käytettävä kvartsihiekkä tuodaan tuontituotteena Belgian rannikolta Suomen valimoteollisuuden tarpeita varten. Merenpohjassa eroosion myötä pyörästynyt kvartsihiekkä on muodoiltaan pyöreää ja hyvin tasarakeista luonnostaan. Ominaisuuksiensa vuoksi se on ihanteellinen raakamateriaali muotinvalmistuksessa. (Sappinen 2016.)

2.2 Valimoteollisuuden sisäinen hiekan kierrätys

Valimohiekan uusiokäyttöä on tutkittu laajalti valimoteollisuuden omiin tarpeisiin valimohiekan elvyttämiseen liittyen, joka mahdollistaa valimohiekan kierrätyksen valimoteollisuudessa sisäisesti. Käytettyä valimohiekkää voidaan kierrättää esimerkiksi elvyttämällä mekaanisesti tai termisesti. Hiekkavalimossa muotinvalmistuksessa käytettävää hiekkää kierrätetään sisäisesti muottien purkamisen jälkeen mekaanisesti. Mekaanisessa kierrätyksessä muotin purkamisen jälkeen hiekkamuotti hierotaan koneellisesti tasarakeiseksi samalla poistaen hienoaaines, eli valimopöly. Hiekkää voidaan kierrättää tavanomaisesti valimolinjaston sisäisesti suhteella 70% kierrätettyä ja 30% uutta hiekkää. Toinen tapa käsitellä hiekkää on terminen elvytys, jossa hiekasta käytännössä poltetaan hiekkään jääneet sideainejäämät ja muut epäpuhtaudet. Tällöin valimohiekalta saadaan palautettua neitseellistä kvartsihiekkää vastaavat ominaisuudet. Nuutajärvelle on rakennettu keskittetty valimohiekkojen puhdistuslaitos, jota kehitetään yhdessä Aalto-yliopiston kanssa. (Sappinen 2018, s.16.)

2.3 Valimohiekkatyypit

Suomessa valimoteollisuus käyttää pääsääntöisesti kolmea eri hiekkaseosta, jotka ovat esterikovetteinen fenolihartsihiekkä (kauppanimeltään alphaset-hiekkä), tuorehiekkä ja furaanihartsihiekkä. Lisäksi valimoteollisuudessa käytetään vähäisiä määriä monia muita valimohiekköjä, esimerkiksi CO₂-kovetteista vesilasihiekkää. Edellä mainituista kolme ensimmäistä, valimoteollisuudessa eniten käytettyä valimohiekkatyyppiä on esitettyä seuraavissa alaluvuissa.

2.3.1 Esterikovetteinen fenolihartsihiekkä

Esterikovetteinen fenolihartsimenetelmä on orgaaninen sideainemenetelmä, joka tunnetaan parhaiten kauppanimellä alphaset-hiekkä. Alphaset tuli markkinoille 1980-luvulla ja on Suomessa eniten käytetty valimohiekkasysteemi nykyisin. Väriltään alphaset on punaruskeaa, joka ilmenee alapuolella olevasta mikroskooppikuvasta (Kuva 2) ja varastointikuvasta (Kuva 3). Menetelmässä hiekkään sekoitetaan kovetteena toimivaa esterä sekä resolityypistä fenoliformaldehydihartsia. Menetelmässä hartsin osuus on 0,9 – 1,7 paino-% hiekan määrästä ja esterin n. 20 – 25 % hartsin määrästä. Kovettumisreaktiossa hartsissa oleva alkalimetalli (kalium tai natrium) reagoi esterin happokomponentin kanssa muodostaen alkalimetallisia suoloja. Samalla esteristä vapautuu alkoholikomponentti. Reaktiotuotteena menetelmässä syntyy polymerisoitunut hartsi, suoloja ja alkoholia. (Orkas *et al.* 1999, s.11.)



Kuva 2. Mikroskooppikuva alphaset-hiekasta. (Tommi Sappinen 2019.)



Kuva 3. Valimokierrosta poistettu alphaset-hiekka varastoituna. (Tommi Sappinen 2019.)

2.3.2 Tuorehiekkä

Tuorehiekkä on Suomessa toiseksi eniten käytetty valimohiekka ja lukeutuu orgaaniseksi valimohiekaksi sideainemenetelmänsä mukaan. Väriltään tuorehiekkä on lähes mustaa, joka havainnollistuu alapuolella olevassa mikroskooppikuvassa (Kuva 4). Tuorehiekkan erottaa muista valimohiekoista bentoniitin ja kosteusjäämien aiheuttamasta paakkuuntumisesta, jonka voi havaita alapuolella olevassa varastointikuvassa (Kuva 5). Sideaineena tuorehiekassa käytetään jauhemaista bentoniittia (1,0...2,0 p-%), joka saadaan sitomiskykyiseksi veden avulla. Lisäksi rautavalimot käyttävät hiekan joukossa lisäaineena joko

perinteistä kivihiilijauhetta (2,5...3,0 p-%) tai polystyreeniä. Tuorehiekalla on alhainen vedenjohtavuus, johtuen bentoniittisavesta, joka lisää hienoaineksen määrää hiekkaseoksessa. (Orkas *et al.* 1999, s.10, Autere *et al.* 1986, Tiehallinto 2007b, s.48.)



Kuva 4. Mikroskooppikuva tuorehiekasta. (Tommi Sappinen 2019.)



Kuva 5. Valimokierrosta poistettu tuorehiekkä varastoituna. (Tommi Sappinen 2019.)

2.3.3 Furaanihartsihiekka

Furaanihartsihiekka, jota kutsutaan myös lyhyemmin furaanihiekaksi, on kolmanneksi eniten käytetty valimohiekka Suomessa ja se lukeutuu orgaaniseksi valimohiekaksi si-deainemenetelmänsä puolesta. Happokovetteiset furaanihartsihiekat kehitettiin 1950-luvun lopulla ja furaanihartsit ovat ensimmäisiä markkinoille tulleita huoneenlämpötilassa kovettuvia kemiallisia hiekan sideaineita. Väriltään furaanihartsihiekka on mustaa, joka ilmenee alla olevassa mikroskooppikuvassa (Kuva 6) ja varastointikuvasta (Kuva 7). Furaanihiekalle tyypillinen ominaisuus on rikin haju, jonka avulla se on selvimmin erotettavissa muista valimohiekoista. Menetelmässä hiekkaan sekoitetaan ensin happokovetetta (käytetyimmät fosfori- tai paratolueenisulfonihappo) 20 – 50 % hartsin määrästä ja tämän jälkeen hartsia, jossa pääkomponenttina furfuryylialkoholi (FA) ja lisäksi ureaformaldehydi (UF) tai formaldehydi (F). Sideaineiden määrä on yhteensä 0,7 – 1,5 paino-% hiekan määrästä. Kovetteena seoksessa fosforihappo (H_3PO_4) tai paratolueenisulfonihappo (PTS). Kovetteen määrä seoksessa riippuu halutusta kovettumisnopeudesta ja kovetteena käytettävän hapon voimakkuudesta. Furaanihartsit kovettuvat happamassa ympäristössä polykondensaatioreaktiolla, jonka sivutuotteena on useimmiten vesi. Reaktio saadaan aikaan joko kuumennuksella tai, kuten furaanihartsimenetelmässä pyritään, happokoveteella. (Orkas *et al.* 1999, s.11, Meskanen & Höök 2015a, s.27.)



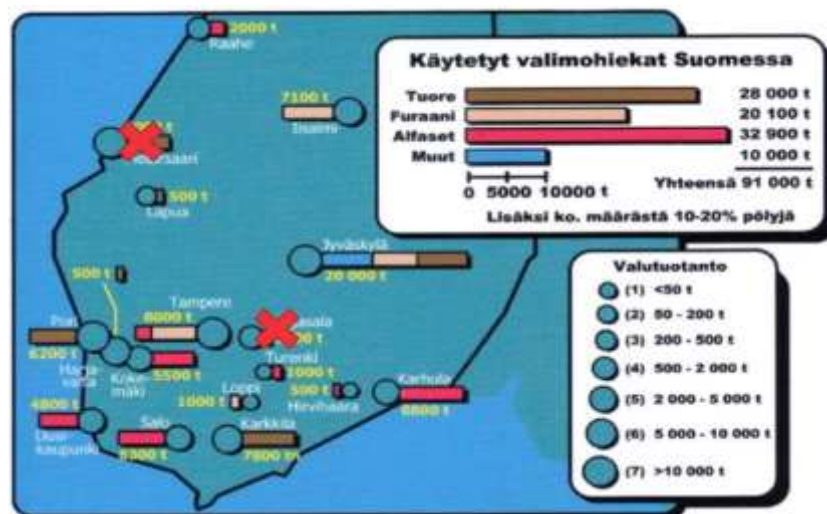
Kuva 6. Mikroskooppikuva furaanihartsihiekasta, jossa suuri määrä kromiittia, ilmentyen metallinkiiltoisena pintana rakeessa. (Tommi Sappinen 2019.)



Kuva 7. Valimokierrosta poistettu furaanihartsihiekka varastoituna. (Tommi Sappinen 2019.)

2.4 Valimohiekkojen synty ja määrät

Jätteeksi luokiteltavia valimohiekkoja syntyy Suomessa vuodessa kaiken kaikkiaan noin 60 000 tonnia/vuosi ja lisäksi valimopölyjä noin 5 000 tonnia/vuosi. Suomen valimoteollisuus on keskittynyt nykyisellään pohjoisimmillaan Raaseen ja sen alapuolelle, pitkälti eteläisempään osaan Suomea. Alapuolella olevassa kuvassa (Kuva 8) yksittäisten valimoiden käyttämiä hiekkamääriä Suomessa ja niiden sijainteja maantieteellisesti. Kuvassa ilmoitetut hiekkavolyymit ovat pienentyneet kuvan laatimisesta. (Aalto-yliopisto 2018, Orkas 2019.)



Kuva 8. Valimoiden sijainnit kartalla ja käytettyjen valimohiekkojen määriä Suomessa. Punaisella ruksilla merkityt ovat toimintansa lopettaneita hiekkavalimoita. (Aalto-yliopisto 2018.)

3 Valimohiekkojen uudelleenkäyttökohteet ja niille tehdyt tutkimukset

Tässä luvussa käydään läpi merkittävimmät valimohiekan uudelleenkäyttökohteet sekä tutkimukset niiden taustalla Suomessa ja kansainvälisesti. Ensimmäinen alaluku ”Tie- ja katurakenteet ja penkereet” on työn kirjallisuusselvitysluku ja sen alle on koottu osa-alueittain maarakennuskohteita, joissa valimohiekan WFS käyttöä on tutkittu ja käytetty sekä Infrarakentamisen yleisten laatuvaatimusten (InfraRYL) (Rakennustieto Oy 2019) mukainen jaottelu soveltuvuudesta väylärakentamiseen. Toisessa luvussa käsitellään valimohiekkojen WFS käytöstä kaatopaikkarakentamisessa ja InfraRYL mukainen jaottelu soveltuvuudesta kaatopaikkarakenteisiin. Viimeisessä luvussa katsaus valimohiekan WFS käyttökohteisiin rakennus-, materiaali- ja energiateollisuudessa sekä kompostointiin. Yhdysvalloissa viranomaisen on laatinut yhdyskuntatekniikan insinöörejä varten käsikirjan valimohiekasta ja sen ominaisuuksista rakentamisessa (U.S. Department of Transportation 2004).

3.1 Tie- ja katurakenteet ja penkereet

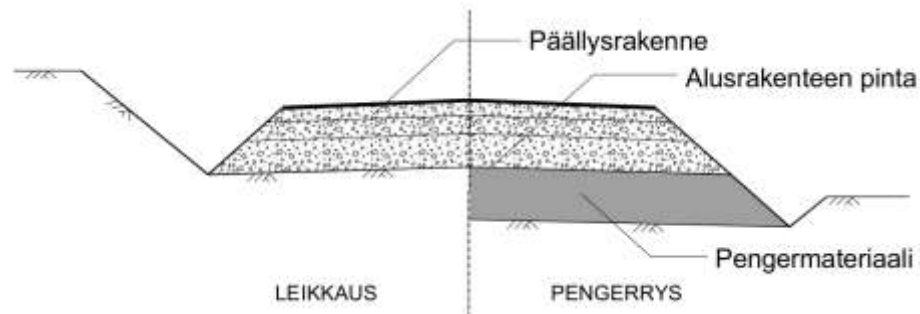
Tie- ja katurakenne tyypillisesti koostuu syvyysuunnassa päällys- ja alusrakenteesta, joka ilmenee alapuolella olevassa kuvassa (Kuva 9). Tierakenteen tehtävä on vastaanottaa ajoneuvojen aiheuttamat kuormat päällysrakenteen pinnassa, jakaa ne alemmille päällysrakennekerroksille ja lopulta johtaa ne alusrakenteelle mahdollisimman tasaisesti ja laajalle alueelle. (Tiehallinto 2002.) Alusrakenteen tulee olla tämän vuoksi mahdollisimman tasalaatuinen, kantava ja painumaton alusta päällysrakenteelle.

Tavanomaisesti alusrakenne koostuu luonnollisesta maa-aineksesta rakennuspaikalla, pengertäyttömateriaalista tai pohjavahvistetusta materiaalista. Alusrakenteena toimiva pohjamaa johtaa tyypillisesti kosteutta ja on herkkä routimiselle. (Doré & Zubeck 2009, s.10.) Edellä mainittujen ilmiöiden vuoksi sen päälle rakennettavat päällysrakennekerrokset tyypillisesti erotetaan suodatinkankaalla tai -kerroksella ja tarvittaessa routaeristeellä estämään roudan tunkeutuminen pohjamaahan. Suodatinkankaan tai -kerroksen tehtävä on lisäksi estää rakennekerrosten sekoittuminen, olla hyvin vettä läpäisevä ja toimia kapillaarikatkona estäen veden imeytyminen alusrakenteesta ylempiin kerroksiin. Päällysrakenteen rakennekerrokset ovat esitettynä kuvassa (Kuva 10) ja edellä mainittujen kerrosten lisäksi se pitää sisällään päällystekerrokset tierakenteen yläosassa, sitomattoman tai sidotun kantavan kerroksen ja jakavan kerroksen.

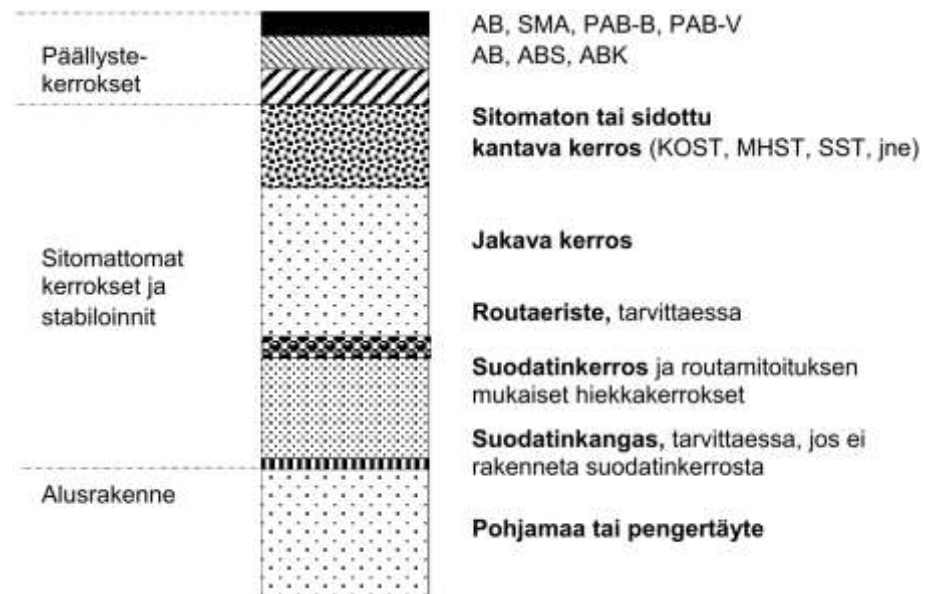
Päällysrakenne tulee suunnitella siten, että se rajoittaa routanousuja ja pysyy mahdollisimman kuivana ympäri vuoden. Sade- ja sulamisvesien johtaminen pois päällysrakenteesta on tärkeää. Tavanomaisesti vedenläpäisevyys rakenteessa kasvaa edettäessä kerroksissa syvyysuunnassa päällystekerroksen ollessa vettä jonkin verran läpäisevä tai läpäisemätön ja suodatinkerroksella ollen suurin vedenläpäisevyys. (Liikennevirasto 2018, s.52.)

Tiealueille tarvittaessa rakennetaan lisäksi penkereitä. Penger on yleisnimitys maarakenteelle, joka voi olla muun muassa tierakenteessa pohjarakenteena päällysrakenteen ja pohjamaan välissä oleva rakennekerros (tiepenger) (Kuva 9) tai vallimaisena rakenteena esimerkiksi meluvälillä (maapenger). Tiepenger voidaan vaihtoehtoisesti keventää (kevennetty penger). Tällöin materiaalina käytetään esimerkiksi alhaisen tilavuuspainon

omaavia materiaaleja tavanomaiseen maa-ainekseen nähden, kuten kevytsoraa tai vaah-
tolasimurskettä. Lisäksi voidaan rakentaa vastapenger tierakenteen rinnalle, jonka avulla
voidaan estää liikennekuormien aiheuttamien leikkausmurtumien tapahtumista tieraken-
teessa.



Kuva 9. Poikkileikkaus tien päällys- ja alusrakenteesta. (Tiehallinto 2002, Kuva 1, s.11.)



Kuva 10. Tien päällysrakenteen kerrokset. Kaikkia kuvan kerroksia ei kuitenkaan yleensä ole samassa rakenteessa. (Liikennevirasto 2018, Kuva 1, s.11.)

Valimohiekka WFS soveltuu tierakenteeseen nykyisten voimassa olevien määräysten mukaan päällysrakenteessa ainoastaan suodatinkerrokseen sitomattomana materiaalina. Lisäksi se on soveltuvaa käytettäväksi liikennekuormitetuissa ja kuormittamattomissa maapenkereissä. Valimohiekan WFS tekninen soveltuvuus väylärakenteisiin on taulukoi-
tuna alapuolella InfraRYL (Rakennustieto Oy 2019) rakenneosittain luokiteltuna (Tau-
lukko 1).

Taulukko 1. Valimohiekan WFS tekninen soveltuvuus väylärakenteen rakenneosiin. (Motiva Oy 2019, Taulukko 2.3.)

| Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset (InfraRYL) | | Valimohiekan soveltuvuus |
|---|--|--------------------------|
| Koodi | Rakennusosa | |
| 21322 | Stabiloidut kantavat kerrokset | - |
| 21300 | Kantavat kerrokset | - |
| 21210 | Jakavat kerrokset | - |
| 21110 | Suodatinkerrokset | Kyllä |
| 18150 | Vastapenkereet | - |
| 18150 | Kevennetyt penkereet | - |
| 18150 | Maapenkereet (tie, katu, tms. penger - "liikennekuormitettu") | Kyllä |
| 18110 | Maapenkereet (meluvallit - "ei liikennekuormitettu") | Kyllä |

Valimohiekan WFS soveltuvuutta tien päällysrakenteeseen sitomattomana tai sidottuna rakennusmateriaalina on tutkittu kansainvälisesti sekä soveltuvuutta päällysteen (asfaltti-betonin) raaka-aineeksi on tutkittu Suomessa. Seuraavissa kappaleissa käydään läpi tutkimustieto tehdyistä tutkimuksista rakennekerroksittain. Huomioitava seikka on, että tutkimukset valimohiekoille WFS ovat sekä valimoprosessissa kemiallisesti että bentoniitilla sidotuille valimohiekoille. Tuorehiekkä eroaa hienoainesjakaumaltaan muista valimohiekoista WFS.

Valimohiekan WFS käyttöä päällysrakenteessa tien kulutuskerroksessa asfalttibetonin runkoaineena on tutkittu TKK:lla, nykyisessä Aalto-yliopistossa. Tutkimuksessa käytettiin furaanihartsihiekkaa korvaamaan luonnonhiekkää asfalttibetoniseoksessa, jota käytettiin koerakenteessa Tampereella (vt 9). Tutkimustuloksena valimohiekan käytölle ei nähty teknisesti ja ympäristön kannalta mitään esteitä. Hartsisideaineiset valimohiekat WFS eivät heikentäneet päällysteen kulumiskestävyyttä. (Orkas *et al.* 2001, s.20.)

American Foundry Society -organisaation ylläpitämällä internet-sivustolla todetaan, että Yhdysvalloissa on hyödynnetty valimohiekkaa myös kantavassa kerroksessa (American Foundry Society 2019), mutta tutkimuksia valimohiekan WFS soveltuvuudesta tierakenteen kantavaan kerrokseen ei löytynyt. Pääosin tutkimukset painottuivat analysoimaan valimohiekan WFS soveltuvuutta sidottuna ja sitomattomana tierakenteen jakavaan kerrokseen. Yhdysvalloissa tehdyssä tutkimuksessa vuodelta 2000 todetaan, että leikkauslujuus valimohiekoilla WFS vaihtelee ja on korkeimmillaan bentoniittia sisältävällä hiekkalla verrattuna valimoprosessissa kemiallisesti sidottuihin valimohiekkoihin WFS. Lisäksi valimohiekoille WFS tehtyjen kantavuuskokeiden mukaan hiekkvoja voitaisiin käyttää teiden alusrakenteissa ja jakavassa kerroksessa korvaamaan tavanomaisia materiaaleja. Tutkimuksessa todetaan, että kantavaan kerrokseen valimohiekat WFS olisivat sopimattomia sellaisenaan, johtuen heikosta kantokyvystä sitomattomana rakennusmateriaalina. (Kleven *et al.* 2000).

Turkissa tehdyssä tutkimuksessa valimohiekalta WFS (tuorehiekkä) määritettiin kalkilla sekä sementillä sidottuna yksiaksiaalinen puristuslujuus (UCS) ja california bearing ratio (CBR). Koekappaleet valmistettiin standard proctor tiiviyyteen. Tutkimuksen tuloksien

perusteella analysoitiin soveltuvuutta jakavaan kerrokseen ja verrattiin neutseelliseen kalliomurskeeseen. Kalkki osoittautui hitaasti lujittuvaksi verrattuna sementtiin myös tässä tutkimuksessa. Yksiaksiaalisen puristuslujuuskokeen tulosten vaihteluväli oli 7 vrk ikäisillä koekappaleilla 0,4...3,2 MPa ja 28 vrk ikäisillä näytteillä 1,9...9,7 MPa. Korkeimmat puristuslujuudet saavutettiin sementillä sidotuilla koekappaleilla. Tutkimuksen mukaan valimohiekkaa WFS (tuorehiekkä) voidaan pitää laadukkaana rakennusmateriaalina tierakenteeseen. (Gedik *et al.* 2008, s.146-147.)

Toisessa Turkissa tehdyssä tutkimuksessa valimohiekkaan WFS (tuorehiekkä) sekoitettiin kalliomursketta eri suhteilla ja lisäksi sideaineina kalkkia tai sementtiä. Tutkimustuloksia analysoitiin sen soveltuvuutta jakavaan kerrokseen. Puristuslujuudessa oli huomattavia eroja eri seosten välillä eri sideaineilla ja ilman sekä eri tiivistysmenetelmien välillä (standard proctor ja parannettu proctor). Yksiaksiaalisen puristuslujuuskokeen tulosten vaihteluväli 1 vrk ikäisillä koekappaleilla, joissa ei käytetty sideaineita oli 0,15...0,8 MPa. Heikoin puristuslujuus saavutettiin 100 % valimohiekka WFS (tuorehiekkä) seoksella (standard proctor) ja korkein puristuslujuus seoksella, jossa 27 % valimohiekkaa WFS ja 73 % kalliomursketta (parannettu proctor). Yksiaksiaalisen puristuslujuuskokeen tulosten vaihteluväli seoksilla, joissa käytettiin sideaineina kalkkia ja sementtiä valimohiekalle WFS ja kalliomurskeelle, vaihteli 7 vrk ikäisillä koekappaleilla noin 0,25...1,2 MPa välillä standard proctor tiiviyydessä. Heikoin puristuslujuus saavutettiin 100 % valimohiekalla WFS (tuorehiekkä) seoksella, jossa sideaineena kalkki 5 p-%. Korkein puristuslujuus saavutettiin seoksella, jossa 27 % valimohiekkaa WFS (tuorehiekkä), 73 % kalliomursketta ja sideaineena sementti 5 p-%. Tutkimuksen yhteenvedossa todetaan, että tuloksien perusteella valimohiekkaa WFS (tuorehiekkä) voitaisiin turvallisesti käyttää tierakenteessa jakavassa kerroksessa. (Guney *et al.* 2006.)

Valimohiekan WFS käyttöä tierakenteessa sitomattomana materiaalina tiepenkereeseen ja pohjarakenteisiin on tutkittu Yhdysvalloissa. Vuonna 1994 tehdyn kattavan tutkimuksen mukaan valimohiekalla WFS on hyvä vedenjohtavuus, mutta poikkeuksena on valimohiekat WFS, joissa sideaineena on bentoniitti, joka aiheuttaa vedenläpäisevyysongelmia rakenteelle. Rakeisuusominaisuuksien perusteella valimohiekoilla WFS on vähäinen tai lähes olematon routivuus. Tiivistymisestä todetaan, että valimohiekat WFS ovat koonpuristuvampia, kuin tavanomainen hiekka. Tiivistysmenetelmistä tärytiivistys oli tehokkain tapa tiivistää valimoprosessissa kemiallisesti sidotuille valimohiekoille WFS. Bentonittia sisältävälle valimohiekalle WFS tehokkain tiivistystapa oli iskutiivistys. Lisäksi huomioitava seikka on, että valimohiekat ovat herkkiä nesteytymiselle. Valimoprosessissa kemiallisesti sidotuista valimohiekoista WFS todetaan, että alhaisen koheesion vaikutuksesta ne ovat alttiita kulumiselle. Bentonitilla sidotut valimohiekat WFS puolestaan sisältävät korkean hienoainespitoisuuden, joka luo koheesion partikkeleiden välille ja se vuoksi eivät ole herkkiä kulumiselle. (Javed 1994.)

Suomessa valimohiekkaa WFS (tuorehiekkä), on suunniteltu käyttäväksi meluvallirakenteessa (maapenger) Karkkilassa ja aiheesta on Mitja Päivinen tehnyt AMK-lopputyönsä. Työssä on laadittu suunnitelmat meluvallin toteuttamiseksi ja sen liitteenä on laboratoriotutkimuksia rakenteessa käytettävälle valimohiekalle, jotka puoltavat bentonitilla valimoprosessissa sidotun valimohiekan soveltuvuutta vallirakenteeseen. (Päivinen 2019, s.32.)

Suomessa käytetään sidottujen päällysrakennekerrosten sideaineiden toimivuudelle suuntaa-antavia ohjeita rakentamisolosuhteille ja liikenneluokille. Ohjeet ovat esitettynä pääl-

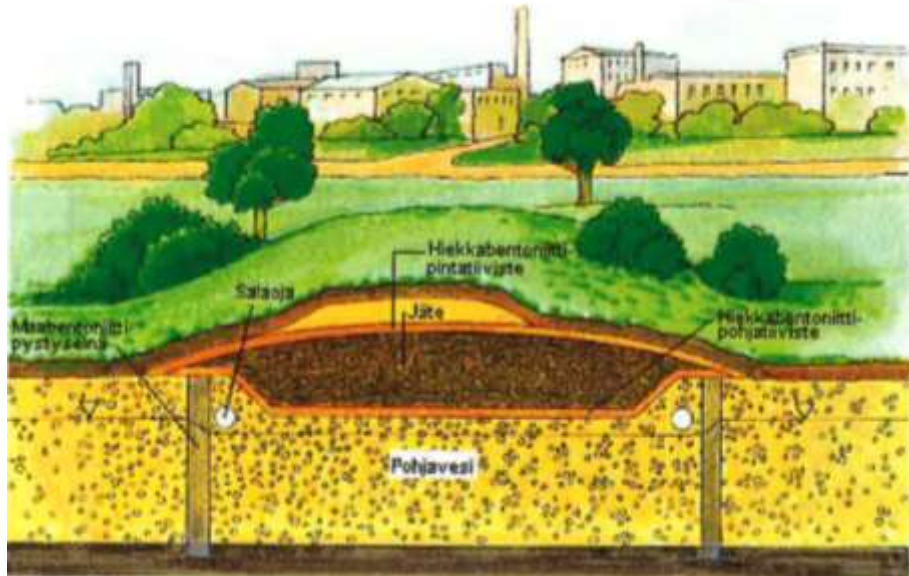
lysrakenteen stabilointiohjeessa (Tiehallinto 2007a) ja ovat taulukoituna seuraavassa taulukossa (Taulukko 2). Taulukossa esitetty masuunihiekka on hitaasti lujittuvaa ja jatkaa sitoutumista rikkoutumisen jälkeen uudelleen. Taulukon (Taulukko 2) mukaan masuunihiekka soveltuu käytettäväksi kohteissa, joissa esiintyy lieviä routanousuja ja tarvitaan hyvää kantavuutta. Sementti on puolestaan nopeasti lujittuvaa ja omaa korkean puristuslujuuden. Sementillä sidotut seokset soveltuvat käytettäväksi kohteissa, joissa tarvitaan suurta kantavuutta ja kuormituskestävyyttä. Masuunihiekalle annetaan ohjearvona alusrakenteen minimi kantavuusarvoksi 70 MPa ja sementillä stabiloidulle vastaavasti 100 MPa. Masuunihiekan ja sementin seokset sijoittuvat edellä mainittujen arvojen väliin. Lisäksi on huomioitava, että masuunihiekalla tai sementillä sidottu rakennekerros voi vaurioitua suolan ja veden yhteisvaikutuksesta. Tämän vuoksi päällystekerros tulee olla tiessä vettä läpäisemätön. (Tiehallinto 2007a, s.21-22.)

Taulukko 2. Sideaineiden soveltuminen erilaisiin stabilointiolosuhteisiin (suuntaa-antavia ohjeita). (Tiehallinto 2007a, Taulukko 1)

| Sideainelaji | Masuunihiekka MaHk | Masuunihiekka MaHk + Sem 0,5...1,3 [%] | Masuunihiekka MaHk + Sem > 1,3 [%] | Sementti |
|--|-----------------------|--|--|-------------------|
| Työmenetelmä | MHST | MHST - A | MHST - A | SST |
| Alustan minimi kantavuus E [MPa] | 70 (heikko) | 80 (heikko) | 100 (kantava) | 100 (kantava) |
| Liikenne | Vilkas, vähäinen | Vilkas, raskas/ vähäinen | Vilkas, raskas/ vähäinen | Vilkas, raskas |
| Alustan routivuus | Lievästi routiva | Lievästi routiva | Routimaton | Routimaton |

3.2 Kaatopaikkarakenteet

Kaatopaikkarakenteissa käytetään eristäviä maarakennekerroksia, joita kutsutaan mineraalieristeiksi. Mineraalieristeen tehtävä kaatopaikkarakenteessa on estää kaatopaikalle varastoidusta materiaalista vaarallisten aineiden liukeneminen pohjamaahan ja aina pohjaveteen asti. Mineraalieriste sisältää maa-aineksen ja sen sekaan sekoitetun bentoniittisaven. Toiminnallinen periaate mineraalieristeessä perustuu veden aiheuttamaan bentoniitin paisumiseen maakerroksessa, joka tällöin tuottaa vettä läpäisemättömän rakenteen ja estää kaatopaikalla varastoidusta materiaalista haitallisten aineiden imeytymisen pohjamaahan. Alapuolella on poikkileikkauskuva kaatopaikkarakenteesta (Kuva 11).



Kuva 11. Mineraalieristeet kaatopaikkarakenteissa. (Orkas *et al.* 2001, Kuva 8.)

Valimohiekan WFS, tarkemmin tuorehiekan käyttöä mineraalieristeinä kaatopaikalla on tutkittu Suomessa TKK:n alaisuudessa, nykyisessä Aalto-yliopistossa. Tutkimuksessa rakennettiin 300 m pitkä eristevalli, jossa käytetystä maa-aineksesta 50 % oli käytettyä valimohiekkaa WFS. Valimohiekasta WFS osittain valmistettu mineraalieriste toimi tutkimuksen mukaan tavanomaiselle mineraalieristeelle asetettujen läpäisykertoimien ja haitallisten aineiden liukoisuudelle asetettujen raja-arvojen rajoissa. (Orkas *et al.* 2001, s.34.)

Nykyisten voimassa olevien laatuvaatimusten mukaan valimohiekka WFS soveltuu käytettäväksi kaatopaikkojen suodatinkerroksessa, keinotekoisien eristeen suojakerroksessa, esipeittokerroksessa, kaasunkeräyskerroksessa, pintarakenteen tiivistyskerroksessa, kaatopaikan pintarakenteen kuivatuskerroksessa, kaatopaikan pintarakenteen pintakerroksessa ja kaatopaikan pintarakenteen kasvukerroksessa. Edellä mainitut InfraRYL (Rakennustieto Oy 2019) mukaiset soveltuvuuskohteet ovat taulukoituna seuraavassa taulukossa (Taulukko 3).

Taulukko 3. Esimerkkejä valimohiekan WFS soveltuvuudesta kaatopaikkarakenteisiin. (Motiva Oy 2019, Taulukko 2.4.)

| Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset (InfraRYL) | | Valimohiekan soveltuvuus |
|---|---|--------------------------|
| Koodi | Rakennusosa | |
| 142512 | Kaatopaikan pohjan rakennettu min. tiivistyskerros | - |
| 142515 | Kuivatuskerros (kaatopaikan pohja) | - |
| 142521 | Suodatinkerros (kaatopaikan pohja) | Kyllä |
| 142514 | Keinotekoisien eristeen suojakerros (kaatopaikan pohja) | Kyllä |
| 142521 | Esipeittokerros (kaatopaikan pintarakenne) | Kyllä |
| 142522 | Kaasunkeräyskerros (kaatopaikan pintarakenne) | Kyllä |
| 142523 | Pintarakenteen tiivistyskerros (kaatopaikan pintarakenne) | Kyllä |
| 142525 | Kaatopaikan pintarakenteen kuivatuskerros | Kyllä |
| 142526 | Kaatopaikan pintarakenteen pintakerros | Kyllä |
| 142527 | Kaatopaikan pintarakenteen kasvukerros | Kyllä |

3.3 Muut uusiokäyttökohteet

Yhdysvalloissa on tutkittu valimohiekan WFS soveltuvuutta sementin valmistuksen raaka-aineena. Valimohiekkaa käytettiin tavanomaisen kvartsihiekan sijaan raaka-aineena ja sementtiklinkkerin valmistuksessa. Raaka-aineiden polttaminen korkeassa lämpötilassa hävitti valimohiekasta orgaaniset ja epäorgaaniset sideainejäämät. Valimohiekka pohjaiselle sementille tehtyjen puristuslujuuskokeiden perusteella ei havaittu esteitä valimohiekan käytölle sementin valmistuksen raaka-aineena verrattuna tavanomaiseen neitseelliseen kvartsihiekkään. (Orkas 1996, s.18-19.)

Valimohiekan WFS hyödyntämistä betonin runkoaineena korvaamaan tavanomaista neitseellistä kiviainesta on tutkittu Suomessa TKK:lla, nykyisessä Aalto-yliopistossa. Tutkimustulosten mukaan valimohiekan käyttö korkean lujuusluokan rakennebetonissa todettiin vaikuttavan tavoiteltuja ominaisuuksia heikentävästi, muun muassa puristuslujuuden osalta, mutta alemman lujuusluokan betonissa, jota käytetään teiden päällysteinä ja katu-
jen piennarkiveyksissä, valimohiekan käytölle runkoaineena ei nähty esteitä värjäytymisen lisäksi. (Orkas 2001, s.91.)

Valimohiekan WFS käyttämistä mineraalivillan valmistuksen raaka-aineena on tutkittu Suomessa (Orkas 1996, Orkas 2001). Mineraalivilla on yleisnimitys lasi- ja kivivillalle, jota kutsutaan myös nimellä vuorivilla. Lasivillan valmistusmateriaalina on lasi, jonka raaka-aineena on luonnonhiekkä (kvartsi). Lasivillan valmistuksessa käytetään lisäksi maasälpää, soodaa, kalkkia, booria ja keräyslasia, joka on kierrätysmateriaali. Kivivillan valmistuksessa raaka-aineina käytetään masuunikuonaa, kvartsia ja alumiinioksidia. Kivivillan valmistuksessa raaka-aineet sulatetaan korkeassa lämpötilassa ja kuiduttaan vaihtelevilla tekniikoilla. Valimohiekkä WFS on soveltuvaa lasivillan raaka-aineena, mikäli raekoko on riittävän pieni ($< 0,7$ mm) ja se on puhdistettu orgaanisista sideaine- ja metallijäämistä. Kromiittihiekkaa ei suositeta lasin ja lasivillan raaka-aineeksi koska se värjää lasin vihreäksi. Valimohiekkä, jossa raaka-aineena on kvartsihiekkä, soveltuu vuorivillan valmistuksen raaka-aineeksi hyvin puhdistettuna. (Orkas 1996, s.21, Orkas 2001, s.59.)

Valimohiekan WFS hyödyntämistä betonin runkoaineena korvaamaan tavanomaista neutraalista kiviainesta on tutkittu Suomessa (Orkas 1996). Tiilenvalmistuksessa käytetään hiekkaa, joka on ominaisuuksiensa puolesta verrattavissa valimohiekkään. Tutkimuksessa tehtyjen kokeiden perusteella valimohiekan käytölle tiilenvalmistuksessa ei ole mineralogisia esteitä. Valimohiekan tulee olla hienonnettua, rakeisuudeltaan pientä (< 1 mm), hiekka saa sisältää valimopölyä ja sen tulee olla vapaa metallipartikkeleista. (Orkas 1996, s.20.)

Valimohiekan WFS soveltuvuutta energiateollisuuden tarpeisiin on tutkittu Suomessa (Orkas 1996). Energiateollisuudessa polttovoimalaitoksissa käytetyissä polttokattiloissa käytetään korkeaa lämpötilaa sietävää kvartsihiekkaa tai maasälpää petimateriaalina (petihiekkana) polttokattilan pohjalla, jonka päälle polttoaine syötetään. Esterikovetteisen valimohiekan (alphaset) hyödyntämistä energiateollisuuden tarpeisiin on tutkittu Suomessa laboratorio-olosuhteissa aiemmin mainitussa työssä. Laboratoriokokeiden tulosten perusteella yleisesti valimohiekan WFS raesuuruus on sovelias käytettäväksi leijupedissä. Valimohiekoista WFS alphaset valimohiekassa todettiin natrium (Na) epäpuhtautena, joka saattaa aiheuttaa paakkuuntumista polttoprosessissa. Furaanihiekköjen käytölle ei tutkimuksen mukaan nähty esteitä. (Orkas 1996, s.21.)

Valimohiekan WFS soveltuvuutta lisäaineeksi kompostointiin on tutkittu Suomessa Aalto-yliopistosta valmistuneessa diplomityössä, jossa on selvitetty kirjallisuuden ja LIFE-foundrysand -tutkimuksen pohjalta orgaanisilla sideaineilla sidottujen valimohiekköjen kompostointia. Kompostointitutkimuksen periaatteena on ollut tutkia valimohiekan soveltuvuutta orgaanisen biojätteen kompostoinnin lisäaineena, lisäten kompostoitavaan biojätteeseen huokoisia, joka mahdollistaa hapen ja kompostointiprosessissa syntyvien kaasujen virtaamista massassa ja näin kiihdyttää kompostoidun materiaalin hajoamisprosessia. Tutkimushankkeen lopputulemana ei nähty esteitä valimohiekköjen käytölle kompostoinnissa ja lisäksi havaittiin, että valimohiekköjä voidaan tehokkaasti puhdistaa haitta-aineista kompostoimalla. (Maharjan 2016, Meehanite Technology Ltd 2018, s.5.) Lisäksi epäorgaanisten valimohiekköjen WFS käyttöä kompostoinnissa ollaan tutkimassa Green Foundry LIFE -hankkeessa (Sappinen 2019).

4 Tutkimuksessa käytetyt materiaalit

Tässä luvussa käydään läpi tutkimuksessa käytetyt materiaalit valimohiekan WFS lisäksi, joiden avulla voidaan sitoa valimohiekkaa WFS ja parantaa sen rakennusteknisiä ominaisuuksia. Irto rakeisen materiaalin puristuslujuutta on mahdotonta tutkia ilman, että koekappaleet sidotaan sideaineella. Lisäksi käydään läpi runkoaineet kivituhka 0/4 ja kalliomurske 0/20, joita sekoitettiin koekappaleisiin puristuslujuusominaisuuden parantamiseksi. Alalukujen 4.1, 4.2 ja 4.3 alla esitetään runkoaineiden keskeiset ominaisuudet rakennettavuuden kannalta: maksimikuivairtotiheys, optimivesipitoisuus ja rakeisuus sekä alaluvussa 4.4 lyhyesti sideaineet ja niiden alkuperä.

Kuivairtitiheydenmaksimi (ρ_d) tarkoittaa tutkittavan materiaalin kuivamassan ja tilavuuden keskinäistä suhdetta tiiveimmässä tilassa ja sen yksikkö on [Mg/m^3]. Optimivesipitoisuus (w_{FI}) on prosentuaalinen vesimäärä [%] kuivamassaan nähden määritettynä tiiveimmässä tilassa. Maksimikuivairtitiheys ja optimivesipitoisuus voidaan määrittää sulomalla proctor-koemenetelmällä tai vaihtoehtoisesti ICT-kiertotiivistimellä. Maksimikuivairtitiheys ja optimivesipitoisuus alphaset valimohiekalle WFS ja kivituhkalle KaM 0/4 on määritetty parannetulla proctor-koemenetelmällä ja lisäksi ICT-kiertotiivistimellä. Kalliomurskeen KaM 0/20 kuivairtitiheys ja optimivesipitoisuus määritettiin ICT-kiertotiivistimellä. Rakeisuuden määrittäminen toteutettiin kuivaseulomalla valimohiekalle WFS, kivituhkalle KaM 0/4 ja kalliomurskeelle KaM 0/20.

4.1 Valimohiekka WFS/WFSR

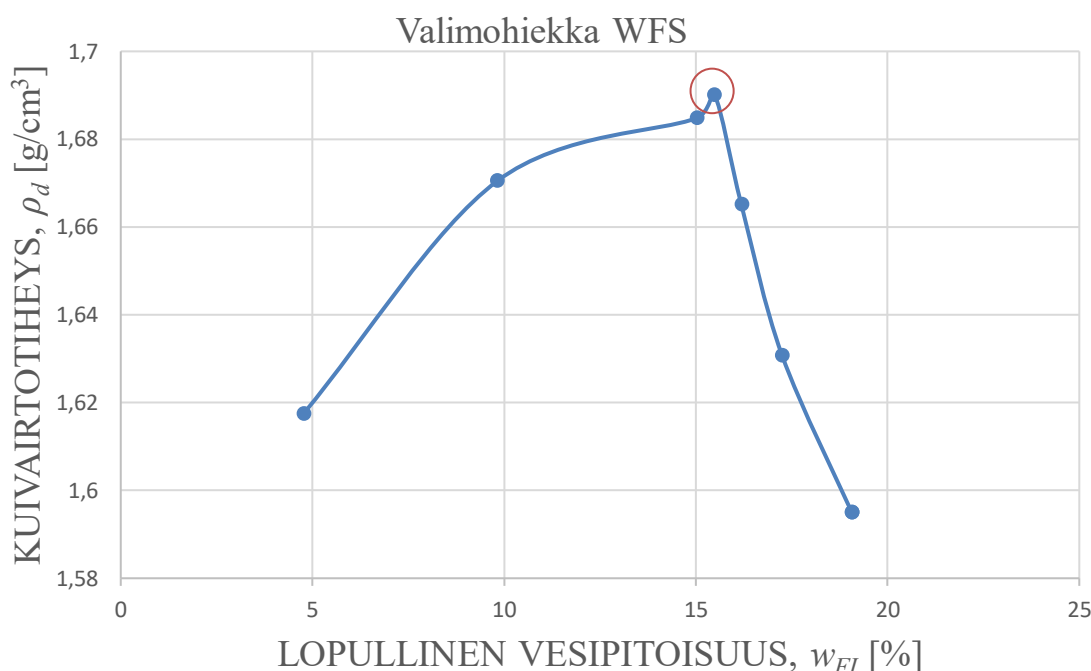
Maksimikuivairtitiheyden ja optimivesipitoisuuden sekä rakeisuuden määrittäminen tehtiin Karhulan valimolta saapuneelle, valimokierrosta poistetulle alphaset valimohiekalle (esterikovitainen fenolihartsihiekka). Tarkempi kuvaus alphaset valimohiekasta ja sen sideainemenetelmästä löytyy luvun 2.4.1 alta. Puristuslujuuskokeissa käytettiin myös referenssinä termisesti elvytettyä valimohiekkaa WFSR valimohiekan + pikasementin seoksena valimohiekan WFS rinnalla. Kuvassa (Kuva 12) nähtävissä rinnakkain valimohiekka WFS ja elvytetty valimohiekka WFSR.



Kuva 12. Vasemmalla valimohiekka WFS ja oikealla termisesti elvytetty valimohiekka WFSR.

4.1.1 Kuivairtoteihs ja optimivesipitoisuus

Maksimikuivairtoteihs ja optimivesipitoisuus tutkittiin valimohiekalle WFS parannetulla proctor-koemenetelmällä, eurooppalaisen standardin SFS-EN 13286-2:2011 työohjeen mukaan. Proctor sulloutuvuuskokeen tarkoituksena on tutkia näytteen suurinta kuivairtoteihsä ja optimivesipitoisuutta sullomalla tutkittavaa ainesta sylinteriin proctor-vasaralla. Tiheys, fysiikan terminä, tarkoittaa massan ja tilavuuden keskinäistä suhdetta ja vesipitoisuus prosentuaalista vesimäärää kuivamassaan nähden. Maksimikuivairtoteihsdeksi parannetulla proctor-koemenetelmällä määritettiin $\rho_d = 1,69 \frac{g}{cm^3}$ ja optimivesipitoisuudeksi $w_{OPT} = 15,48 \%$. Kuvaaja parannetun proctor-kokeen tuloksista alapuolella (Kuva 13).



Kuva 13. Parannetun proctor-kokeen tulosten kuvaaja valimohiekalle WFS.

Vertailuarvoksi valimohiekan WFS maksimikuivairtoteihs ja optimivesipitoisuus määritettiin ICT-kiertotiivistimellä. ICT-kiertotiivistyksen työkiertomäärä määrittäksessä oli $512 + 256 = 768$ kierrosta yhteensä, korkeuden ja leikkauksen saavutettua muuttumattomat arvot. Näytteen tavoitekosteus oli 15,48 paino-% valimohiekasta WFS. Kiertotiivistimen koemenetelmäkuvaus esitettynä Tiehallinnon ”ICT-koe tien rakennekerrosmateriaalien deformaatioherkkyyden määrittämisessä” sivulla 12. ICT-kiertotiivistimellä tiivistetyn valimohiekan WFS maksimi kuivairtoteihsdeksi määritettiin $\rho_d = 1,70 \frac{g}{cm^3}$ ja optimivesipitoisuudeksi $w_{OPT} = 14,1 \%$, uunikuivaamalla näyte 105° celsiusasteessa 24 tuntia. Kiertotiivistimen liikekulma 22 mrad, aksiaalipaine 600 kPa ja pyörintänopeus 26,2 rpm.

4.1.2 Rakeisuus

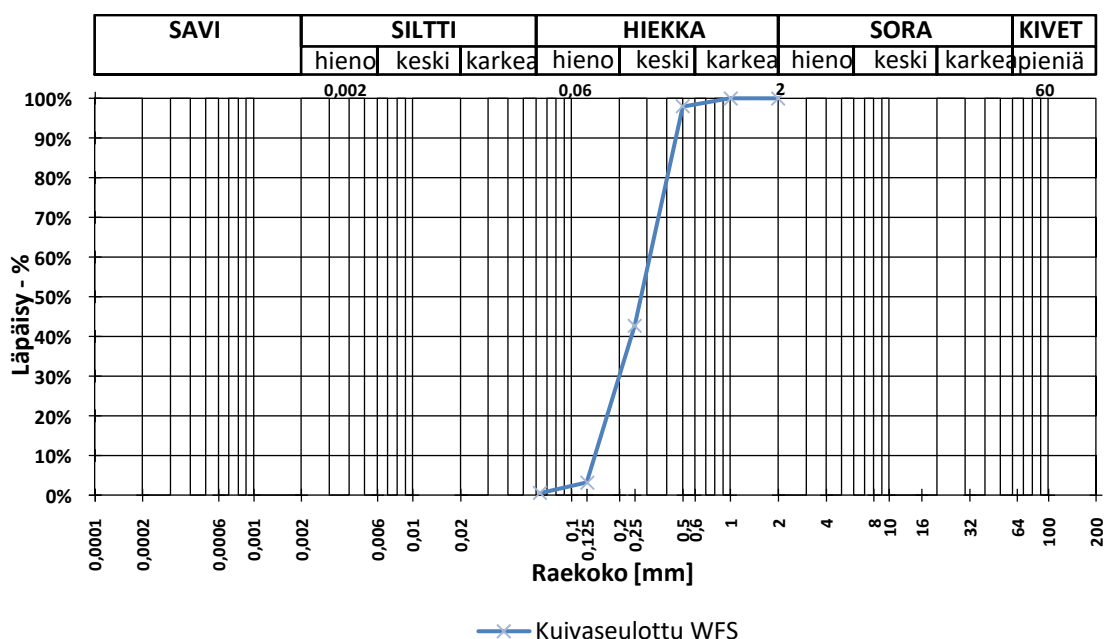
Rakeisuus määritettiin valimohiekalle Aalto-yliopiston tietekniikan laboratoriossa kuivaseulontamenetelmällä eurooppalaisten standardien SFS-EN 933-1:2012 ja SFS-EN 933-2:1996 työohjeiden mukaan. Seulontanäyte valmisteltiin neliöimällä näyte euroop-

palaisen standardin SFS-EN 932-1:1997 mukaan ja seulontanäytteitä oli yhteensä 6 kappaletta. Valimohiekka WFS GEO- ja ISO-maalajiluokitus (Taulukko 4), sekä näytteiden keskiarvoinen rakeisuuskäyrä on esitetty seuraavassa kuvaajassa (Kuva 14). Tulokset eivät juuri poikenneet toisistaan seulojen kesken ja hienoaineksen osuus ($< 0,063$ mm) oli alle 1% luokkaa seulotuissa näytteissä. Tarkemmat luvut näytteille rakeisuudenmääritykselle liitteessä 1.

Taulukko 4. GEO ja ISO-luokitus valimohiekalle WFS. (Korhonen et al. 1974, SFS-EN ISO 14688-1:2018.)

| Valimohiekka WFS | |
|---|--|
| GEO-luokitus (K. Korhonen & al. 1974) | Keskikarkea Hiekka (Hk) (d_{50} raekoko $0,06 \dots 2,0$ mm) |
| ISO-luokitus (SFS-EN ISO 14688-1:2018) | Hiekka (Hk) / Sand (Sa) ($0,063 \dots 2,0$ mm) |

Rakeisuus valimohiekka WFS



Kuva 14. Valimohiekan WFS rakeisuuskäyrä.

Eurooppalaisen standardin SFS-EN ISO 14688-2:2018 mukaan kaarevuussuhde (coefficient of curvature) C_C ja raekokosuhde (coefficient of uniformity) C_U määritettynä valimohiekalle WFS alapuolella olevassa taulukossa. Valimohiekka WFS on määritelmältään tasarakeinen.

Taulukko 5. Valimohiekan WFS rakeisuusmääritelmä. (SFS-EN ISO 14688-2:2018.)

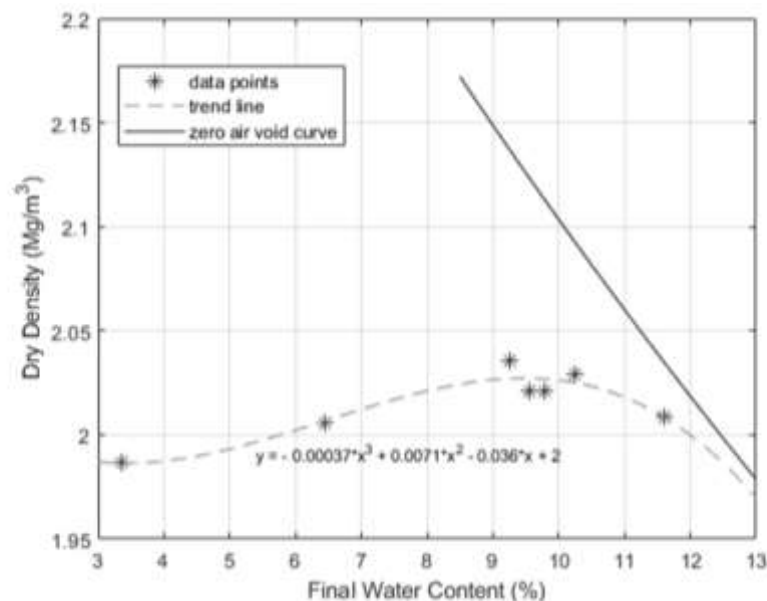
| Menetelmä | Alphaset WFS | | Määritelmä |
|-------------------------|--------------|------|--------------------------------|
| SFS-EN ISO 14688-2:2018 | C_C | 0,89 | Tasarakeinen |
| Taulukko 2 | C_U | 2 | ($C_U < 3$) ja ($C_C < 1$) |

4.2 Kivituhka KaM 0/4

Kivituhka on kallion louhinnassa syntyvää kiviainestuotannon sivutuottetta. Kivituhkaa syntyy myös, kun kalliomurskeesta jalostetaan katkaistuja lajikkeita, kuten KaM 8/16, joka tunnetaan myös tavanomaisemmin nimellä sepeli. Kiviaineksen louhinnassa, louhintatavasta riippuen, voi syntyä 20 % kivituhkaa. (Melander 2018, s.26). Kivituhka valittiin valimohiekka WFS seoksen runkoaineen lisäaineeksi, jotta voitiin tutkia rakeisuusalueen laajenemisen vaikutus sidottujen koekappaleiden puristuslujuuteen. Tässä tutkimuksessa käytettiin kivituhkaa KaM 0/4 Destian Loviisan Koskenkylän murskaamolta.

4.2.1 Kuivairtotehiys ja optimivesipitoisuus

Tutkimuksessa käytetyn kivituhkan KaM 0/4 maksimikuivairtotehiyden ja optimivesipitoisuuden arvoina käytettiin Zhang *et al.* (2019a) tutkimusartikkelin tuloksia. Tutkimusartikkelissa parannetulla proctor-koemenetelmällä eurooppalaisen standardin SFS-EN 13286-2:2011 työohjeen mukaan määritettynä. Maksimikuivairtotehiydeksi kivituhkalle KaM 0/4 määritettiin $\rho_d = 2,04 \frac{Mg}{m^3}$ ja optimivesipitoisuudeksi $w_{OPT} = 9,3 \%$. Kuvaaja parannetun proctor-kokeen tuloksista kivituhkalle KaM 0/4 esitettynä alapuolella (Kuva 15). (Zhang *et al.* 2019a, s.7.)



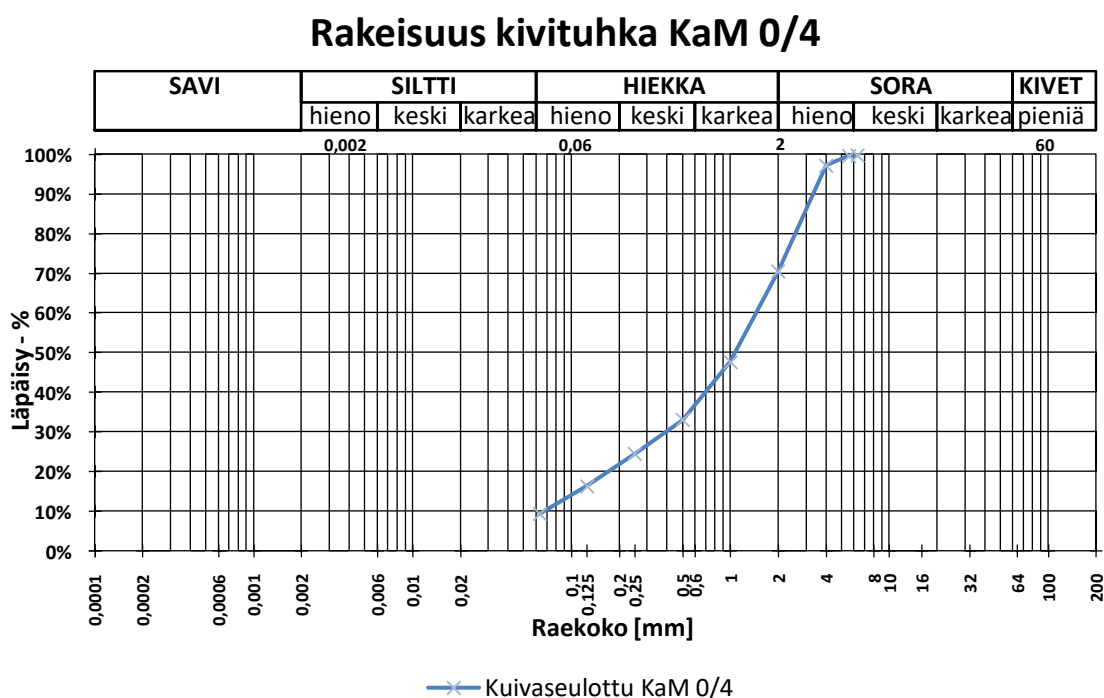
Kuva 15. Parannetun proctor-kokeen tulosten kuvaaja kivituhkalle KaM 0/4. (Zhang *et al.* 2019a.)

4.2.2 Rakeisuus

Tutkimuksessa käytetyn kivituhkan KaM 0/4 rakeisuuden määrittäminen löytyy tutkimusartikkelista Zhang *et al.* (2019a, s.5). Kivituhkan KaM 0/4 GEO- ja ISO-maalajiluokitus (Taulukko 6), sekä näytteiden keskiarvoinen rakeisuuskäyrä on esitettynä seuraavassa kuvajassa (Kuva 16).

Taulukko 6. GEO- ja ISO-luokitus kivituhkalle KaM 0/4. (Korhonen et al. 1974, SFS-EN ISO 14688-1:2018.)

| Kivituhka KaM 0/4 | |
|---|---|
| GEO-luokitus (K. Korhonen & al. 1974) | Karkea Hiekka (Hk) (d_{50} raekoko 0,06...2,0 mm) |
| ISO-luokitus (SFS-EN ISO 14688-1:2018) | Hiekka (Hk) - Hieno Sora (Sr) / Sand (Sa) - Fine Gravel (fGr) (0,063...2,0 mm) - (2,0...6,3 mm) |



Kuva 16. Kivituhkan KaM 0/4 rakeisuuskäyrä. (Zhang et al. 2019a, s.5.)

Eurooppalaisen standardin SFS-EN ISO 14688-2:2018 mukaan kaarevuussuhde (coefficient of curvature) C_C ja raekokosuhde (coefficient of uniformity) C_U määritettynä kivituhkalle KaM 0/4 alapuolella olevassa taulukossa. Arvot on poimittu samaisesta tutkimuksesta, josta rakeisuuskäyrän tiedot (Zhang et al. 2019a, s.5). Kivituhka on määritelmältään sekarakeinen/suhteistunut.

Taulukko 7. Kivituhkan KaM 0/4 rakeisuusmääritelmä. (SFS-EN ISO 14688-2:2018.)

| Menetelmä | Kivituhka KaM 0/4 | | Määritelmä |
|-------------------------|-------------------|------|---|
| SFS-EN ISO 14688-2:2018 | C_C | 2,2 | Sekarakeinen / Suhteistunut |
| Taulukko 2 | C_U | 28,8 | ($C_U > 15$) ja ($1 \leq C_C \leq 3$) |

4.3 Kalliomurske KaM 0/20

Kalliomurske (KaM) on kalliooperästä louhimalla kalliooperästä irroitettua kiviainesta, joka on murskattu ja seulottu haluttuun rakeisuuteen. Tärkeimmät ominaisuudet kalliomurskeella rakentamisen kannalta ovat lujuus, rakenteiden muoto, karheus ja rakeisuus. (Melander 2018, s.25.) Kalliomurske KaM 0/20 valittiin runkoaineeksi valimohiekan WFS sekaan, koska sitä on hyvin saatavilla kiviainesmurskaamoilta ympäri Suomea ja sen rakeisuusalue on kivituhkaa KaM 0/4 laajempi. Rakeisuusalueen laajuuden vaikutus, sidottujen valimohiekka WFS koekappaleiden puristuslujuuteen haluttiin tutkia. Tässä tutkimuksessa käytettiin kalliomursketta Destian Loviisan Koskenkylän murskaamolta, joka katkaistiin KaM 0/32 murskeesta laboratoriotutkimuksia varten rakeisuusjakaumaan KaM 0/20.

4.3.1 Kuivairtotiheys ja optimivesipitoisuus

Maksimikuivairtotiheys ja optimivesipitoisuus tutkittiin kalliomurskeelle ICT kiertotiivistimellä. Tavoitekoosteudeksi kalliomurskeeseen KaM 0/20 lisättiin 10 paino-% vettä. Maksimikuivairtitiheydeksi määritettiin $\rho_d = 1,97 \frac{g}{cm^3}$ ja optimivesipitoisuudeksi näytteelle määritettiin $w_{OPT} = 5,78 \%$, uunikuivaamalla näyte 105° celsiusasteessa 24 tuntia. ICT-kiertotiivistyksen työkiertomäärä määrittäessä oli $512 + 256 = 768$ kierrosta yhteensä, korkeuden ja leikkauksen saavutettua muuttumattomat arvot. Kiertotiivistimen liikekulma 22 mrad , aksiaalipaine 600 kPa ja pyörintänopeus $26,2 \text{ rpm}$. Tiehallinnon ohjeissa on esitettyä kiertotiivistimen menetelmäkuvaus Tiehallinto (2001, s12).

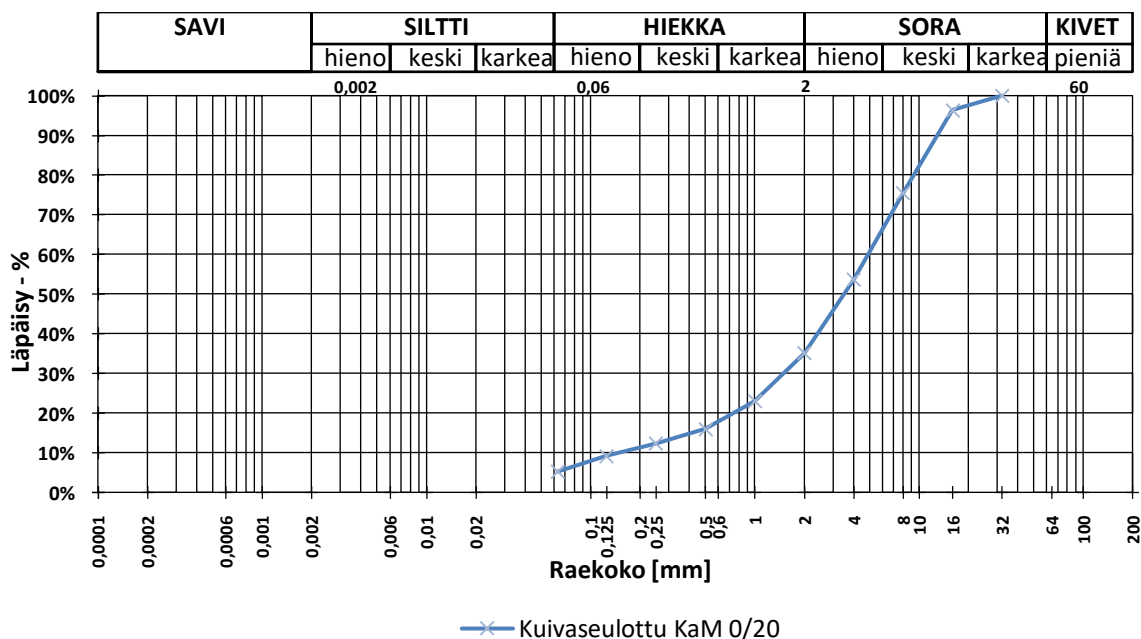
4.3.2 Rakeisuus

Rakeisuus määritettiin kalliomurskeelle KaM 0/20 Aalto-yliopiston tietekniikan laboratoriossa kuivaseulontamenetelmällä eurooppalaisten standardien SFS-EN 933-1:2012 ja SFS-EN 933-2:1996 työohjeiden mukaan. Kalliomurske KaM 0/20 seulontanäytteet valmistettiin neliöimällä eurooppalaisen standardin SFS-EN 932-1:1997 mukaan. Seulontakeriä yhteensä 4 kappaletta. Kalliomurskeen KaM 0/20 GEO- ja ISO-maalajiluokitus (Taulukko 8), sekä näytteiden keskiarvoinen rakeisuuskäyrä on esitettyä seuraavassa kuvajassa (Kuva 17).

Taulukko 8. GEO- ja ISO-luokitus kalliomurskeelle KaM 0/20. (Korhonen et al. 1974, SFS-EN ISO 14688-1:2018.)

| Kalliomurske KaM 0/20 | |
|---|--|
| GEO-luokitus (K. Korhonen & al. 1974) | Sora (Sr) (d_{50} raekoko 2,0...60 mm) |
| ISO-luokitus (SFS-EN ISO 14688-1:2018) | Hiekka (Hk) - Keskiparkea Sora (Sr) / Sand (Sa) - Medium Gravel (mGr) (0,063...2,0 mm) - (6,3...20 mm) |

Rakeisuus kalliomurske KaM 0/20



Kuva 17. Kalliomurskeen KaM 0/20 rakeisuuskäyrä.

Eurooppalaisen standardin SFS-EN ISO 14688-2:2018 mukaan kaarevuussuhde (coefficient of curvature) C_C ja raekokosuhde (coefficient of uniformity) C_U määritettynä kalliomurskeelle KaM 0/20 alapuolella olevassa taulukossa. Kalliomurske on määritelmältään sekarakeinen/suhteistunut.

Taulukko 9. Kalliomurskeen KaM 0/20 rakeisuusmääritelmä. (SFS-EN ISO 14688-2:2018.)

| Menetelmä | Kivituhka KaM 0/20 | | Määritelmä |
|-------------------------|--------------------|-------|---|
| SFS-EN ISO 14688-2:2018 | C_C | 2,83 | Sekarakeinen / Suhteistunut |
| Taulukko 2 | C_U | 29,41 | ($C_U > 15$) ja ($1 \leq C_C \leq 3$) |

4.4 Sideaineet

Tässä luvussa käydään läpi sideaineet, joiden avulla valmistettiin sidottuja koekappaleita valimohiekalle, valimohiekan ja kivituhkan seokselle sekä valimohiekan ja kalliomurskeen seokselle puristuslujuuskoetta varten. Sideaineet valittiin tutkimusta varten kokeusperäisesti.

4.4.1 Pikasementti CEM I

Sementti on epäorgaaninen hienojakoinen materiaali, jota käytetään lähinnä betonin valmistuksessa seoksen raaka-aineena runkoaineen ja veden lisäksi. Sementin raaka-aineena on kalkkikivi ja luonnonmineraalit. Kemiallisesti sementti koostuu kalsiumista, piistä, alumiinista, raudasta ja sulfaatista. Sementin raaka-aineet jauhetaan hienoksi ja poltetaan uunissa noin 1450 °C lämpötilassa, jolloin mineraalit sulavat ja reagoivat keskenään. Samalla kalkkikiven sisältämä hiilidioksidi vapautuu. Reaktiotuotteena syntyy kalsiumsiliikaateista muodostuvia ns. klinkkerimineraaleja, joista sementti jauhetaan lopulliseen

muotoonsa. Tavanomainen harmaa väri sementissä johtuu rautayhdisteistä, joka käy esiin alapuolella olevasta kuvasta (Kuva 18). (Suomen Betoniyhdistys ry 2016, s.28, Betoniteollisuus ry 2019.)



Kuva 18. Pikasementtiä CEM I säilytysastiassa.

Tutkimuksessa käytetty sementtilaatu on pikasementti CEM I 52,5 R. Pikasementti on erittäin nopeasti kovettuva portlandsementti. Pikasementtiä on käytetty tutkimuksessa sidotuissa koekappaleissa sideaineena sellaisenaan, ja lisäksi kivihiilen polton- sekä biopolton lentotuhkien kanssa aktivaattorina. Pikasementin ominaisuuksia, -seosaineet ja klinkkerin kemiallinen koostumus on listattuna alapuolella olevassa taulukossa (Taulukko 10). Tutkimuksissa käytetään pikasementille lyhennettä CEM sideaineena ja A aktivaattorina.

Taulukko 10. Pikasementin CEM I ominaisuuksia. (Finnsementti Oy 2019.)

| Pikasementin ominaisuuksia | | | Pikasementin seosaineet | | |
|----------------------------|-----------|--------------------|---|-----------|---|
| Lujuus 7d | 41...46 | MPa | Kalkkikivi | 0...5 | % |
| Lujuus 28d | 57...68 | MPa | Masuunikuona | - | % |
| Sitoutumisajan alku | 120...180 | min | Klinkkerin kemiallinen koostumus | | |
| Tilavuuden pysyvyys | 0...2,0 | mm | | | |
| Hienous (Blaine) | 490...570 | m ² /kg | Kalsiumoksidi CaO | 63...65 | % |
| Hehkutushäviö | 1,8...3,0 | % | Piioksidi SiO ₂ | 20...22 | % |
| Lukenematon jäännös | 0,3...0,9 | % | Alumiinioksidi Al ₂ O ₃ | 4,0...5,4 | % |
| SO ₃ | 3,5...3,9 | % | Rauta(III)oksidi Fe ₂ O ₃ | 2,8...3,3 | % |
| Kloridipitoisuus | ≤ 0,08 | % | Magnesiumoksidi MgO | 2,5...3,2 | % |
| Cr6+ | 0...2 | mg/kg | | | |

4.4.2 Kivihiilen polton lentotuhka

Kivihiilen polton lentotuhka on energiateollisuudessa kivihiilen polttamisen palamistuotteenä syntyvä tuhka, joka kerätään talteen polttoprosessissa suodattimien avulla palamisen savukaasuista. Lentotuhka tarkoittaa nimensä mukaisesti lentävää, leijailevaa tuhkaa ja sitä syntyy noin 10 % – 15 % kivihiilen alkuperäisestä painosta. Lentotuhkan lisäksi

kivihiilen polton sivutuotteena syntyy pohjatuhkaa, mutta se on lujittumisominaisuuksiltaan heikko, toisin kuin lentotuhka, jolla on hyvät lujittumisominaisuudet (Energiateollisuus ry 2010). Väriltään kivihiilen polton lentotuhka on lähes mustaa, joka käy esiin alapuolella olevasta kuvasta (Kuva 19). Tutkimuksissa käytetään kivihiilen polton lentotuhkalle lyhennettä KPLT. Mikäli seassa on aktivaattori, on lyhenne muotoa KPLTA (tai KPLT+A).



Kuva 19. Kivihiilen polton lentotuhkaa säilytysastiassa.

Tutkimuksessa käytetty kivihiilen polton lentotuhka on peräisin Helen Oy:n Hanasaaren voimalaitokselta. Lentotuhkan valmistuspäivämäärä on 2018-07-10. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 11) listattuna suuntaa antavia tyypillisiä geoteknisiä indeksiominaisuuksia kivihiilen polton lentotuhkalle. Tuhkarakentamisen käsikirjassa on esiteltyä lisää tietoa tuhkien ominaisuuksista ja niiden soveltuvuudesta maarakentamisessa. (Energiateollisuus ry 2012, s.12.)

Taulukko 11. Lentotuhkan tyypillisiä geoteknisiä indeksiominaisuuksia. (Energiateollisuus ry 2010, s.12.)

| Ominaisuus | Olosuhde | Lentotuhka |
|--|--------------|--------------------------------------|
| Rakeisuus [mm] | | 0,002...0,1 (siltti) |
| Optimivesipitoisuus [%] | | 20...50 |
| Maksimikuivairtoteheys [kg/m ³] | | 1100...1400 |
| Märkäirtoteheys tiivistettynä [kg/m ³] | | 1300...1500 |
| Kitkakulma [°] | lujittumaton | 28...36 |
| | lujittunut | 49...77 |
| Koheesio [kPa] | lujittumaton | 23...47 |
| | lujittunut | 64...490 |
| Vedenläpäisevyys [m/s] | lujittumaton | 10 ⁻⁷ ...10 ⁻⁶ |
| | lujittunut | 10 ⁻⁸ ...10 ⁻⁶ |
| Hehkutushäviö [%] | | 1...15 |
| Lämmönjohtavuus [W/mK] | sula | 0,4...0,6 |
| | jäätynyt | 0,8 |
| Segregaatiopotentiaali [mm ² /Kh] | | 0,05...5 |

4.4.3 Ecolan Oy:n uusiosideaine

Tutkimuksessa käytetty Ecolan Oy:n kaupallinen uusiosideaine (Stabi 80) on tuhkien ja sementin seos, jossa on noin 80 % tuhkaseosta ja 20 % sementtiä (CEM I 42,5 N). Tuhkaseos sisältää kivihiilen polton lentotuhkaa, jonkin verran biopolton lentotuhkaa ja kalkkipitoisen lietteen tuhkaa. Uusiosideaine on hienoudeltaan yhtä hienoa tai hienompaa, kuin pikasementti (Räisänen 2019). Uusiosideaine saapui tutkimusta varten 2019-03-26. Väriltään uusiosideaine on hyvin lähellä sementtiä, joka käy ilmi alapuolella olevasta kuvasta (Kuva 20). Uusiosideaineelle käytetään tutkimuksissa lyhennettä ECO.



Kuva 20. Ecolan Oy:n stabi 80 uusiosideainetta säilytysastiassa.

4.4.4 Biopolton lentotuhka

Tutkimuksessa käytetty biopolton lentotuhka on biomassan ja hevosenlannan polttamisen tuotteena syntyvää tuhkaa. Biomassa ei sisällä kierrätyspuuta. Biopolton lentotuhka on kirjallisuuden mukaan lähellä kivihiilen polton lentotuhkaa geoteknisiltä ominaisuuksiltaan, mutta laadulliset ominaisuudet vaihtelevat poltettavan biomateriaalin, käytetyn polttoaineen ja -tekniikan mukaan (Rakennustieto Oy). Erityisesti polttolämpötila sekä lentotuhkanerotustekniikka vaikuttavat koostumukseen. Biopolton lentotuhka kerätään polttoprosessissa savukaasuista, kuten kivihiilen poltossa. Biopolton lentotuhka on peräisin Fortum Oy:n Järvenpään polttovoimalaitokselta ja valmistui polttoprosessissa 2019-04-11. Alapuolella olevassa kuvassa (Kuva 21) havaittavissa biotuhkan epähomogeenisyys. Biopolton lentotuhkalle käytetään tutkimuksissa lyhennettä BPTL. Mikäli seassa on aktivaattori, on lyhenne muotoa BPLTA (tai BPLT+A).



Kuva 21. Biopolton lentotuhkaa säilytysastiassa.

5 Laboratoriokokeet valimohiekalle WFS

Tässä luvussa käydään läpi rakeiselle, sitomattomalle valimohiekalle WFS (alphaset) tehdyt geotekniset laboratoriokokeet ja niiden tulokset alaluvuissa.

5.1 Kiintotiheys

Kiintotiheydellä tarkoitetaan aineen kiinteän aineksen massan suhdetta tilavuuteen, joka aineella olisi, jos se koostuisi kiinteästä aineesta ilman rakeiden välissä olevaa ilmaa. Kiintotiheyden yksikkö on massa jaettuna tilavuudella [$\frac{g}{cm^3}$]. Kiintotiheys valimohiekalle määritettiin pyknometrimenetelmällä neljästä näytteestä, kirjan Geotekniset laboratorio-ohjeet GLO-85 mukaan (Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry 1985, s.25). Uunikuivattu valimohiekka punnittiin esikalibroituissa pyknometreissä sellaisenaan. Punnitsemisen jälkeen pyknometreihin lisättiin tislattua vettä, ylittäen näytteen yläpinnan ja sen annettiin imeytyä näytteeseen yhden tunnin ajan. Pyknometrit asetettiin alipainesäiliöön, jonka avulla näytteistä imettiin huokoisiin jäänyt ylimääräinen ilma. Alipaineimun jälkeen pyknometrit täytettiin tislatulla vedellä ja suljettiin korkeilla. Näytteet asetettiin vesikiertoiseen lämmittimeen saavuttamaan 22,9° celsiusasteen lämpötila, jonka jälkeen näytteet punnittiin uudelleen.

Alapuolella on taulukoituna (Taulukko 12) valimohiekalle WFS määritettyjä kiintotiheyden arvoja neljästä näytteestä sekä keskiarvo näytteille ollen $\rho_s = 2,655 \frac{g}{cm^3}$. Valimohiekalle WFS määritetyt kiintotiheyden arvot ovat hyvin lähellä puhtaalle kvartsihiekalle kirjallisuudessa (Autere *et al.* 1986) ilmoitettua kiintotiheyttä $\rho = 2,65 \frac{g}{cm^3}$.

Taulukko 12. Valimohiekalle WFS määritettyjä kiintotiheyden arvoja.

| Näyte | Kiintotiheys |
|-------|-------------------|
| # | $\rho_s [g/cm^3]$ |
| 1 | 2,656 |
| 2 | 2,652 |
| 3 | 2,656 |
| 4 | 2,656 |
| KA. | 2,655 |

5.2 Vedenimukyky

Vedenimu tarkoittaa materiaalin kykyä sitoa vettä huokoisiinsa löyhässä tilassa ja se ilmaistaan prosentteina massasta [%]. Vedenimukyky valimohiekalle WFS määritettiin kuudesta näytteestä soveltaen eurooppalaisen standardin SFS-EN 1097-6:2014 kohdan 9.4 menetelmää. Näytteet asetettiin lasiastioihin ja näytteisiin lisättiin tislattua vettä ylittäen näytteen yläpinta sekoittaen. Veden annettiin imeytyä yhden tunnin ajan, poiketen standardin 24 tunnin upotusajasta. Näytteet asetettiin alipainesäiliöön ja niistä imettiin huokoisiin jäänyt ilma. Alipaineimun jälkeen näytteet asetettiin vesikiertoiseen lämmittimeen saavuttamaan 23° celsiusasteen lämpötila, jonka jälkeen näytteistä kaadettiin ylimääräinen vesi, estäen näytettä kulkeutumasta pois astiasta hienon seulan avulla. Näyte

levitettiin metallisiin astioihin tasaiseksi levymäiseksi kerrokseksi ja pintakosteuden annettiin haihtua näytteestä. Näytteen saavutettua tila, jossa näytteestä silmämääräisesti arvioitu huokosvesi oli poistunut, punnittiin massan määrittämiseksi. Lopuksi näyte asetettiin uuniin ja sen massa punnittiin uunikuivattuna 24 tunnin kuluttua.

Alapuolella on taulukoituna (Taulukko 13) valimohiekalle WFS määritettyjä vedenimukyvyn arvoja kuudesta näytteestä sekä keskiarvo näytteille, ollen $WA_1 = 12,65 \%$.

Taulukko 13. Valimohiekalle WFS määritettyjä vedenimukyvyn arvoja.

| Näyte # | Vedenimukyky [%] |
|------------|---------------------|
| 1 | 10,7 |
| 2 | 14,5 |
| 3 | 10,7 |
| 4 | 14,3 |
| 5 | 13,0 |
| 6 | 12,7 |
| KA. | 12,65 |

5.3 pH-arvo

pH-arvo ilmaisee aineen happamuuden tai emäksisyyden voimakkuutta asteikolla 0 – 14, jossa 7 on neutraali, alle 7 arvolla aine on hapan ja yli seitsemän aine on emäksinen. Arvo ilmoitetaan yksiköttömänä. pH-arvo valimohiekalle määritettiin Aalto-yliopiston maalariorion omalla menetelmällä (Aalto-yliopisto 2017) käyttäen kalibroitua elektronista pH-arvon ilmaisulaitetta. Menetelmässä käytetty seosnäyte valmistettiin yhdistämällä jauhattua valimohiekkaa 20 ml ja 50 ml tislattua vettä seoslasissa, antaen tislattun veden imeytyä näytteeseen 24 h. Imeytyksen jälkeen seos sekoitettiin huolellisesti ja sekoittuneen seoksen pH-arvo mitattiin kalibroidulla ilmaisimella. Koe toteutettiin uunikuivaetuille ja kuivaamattomille näytteille. pH-arvon määrittäminen tehtiin uunikuivaetuille ja uunikuivaamattomalle valimohiekalle WFS, ja molemmista tutkittiin kolme näytettä.

Uunikuivattu valimohiekka WFS on lievästi emäksisempää, kuin uunikuivaamaton WFS tulosten perusteella. Tulokset uunikuivaetuille ja kuivaamattomalle valimohiekalle WFS on esitetty alapuolella olevissa taulukoissa (Taulukko 14, Taulukko 15). pH-arvojen keskiarvot uunikuivaetuille ja uunikuivaamattomalle ovat 9,17 ja 9,4. Lisäksi on vertailuarvoja aikaisemmasta tutkimuksesta (Taulukko 16) alphaset valimohiekalle WFS, jotka ovat lievästi emäksisempiä, kuin tässä tutkimuksessa määritetyt arvot valimohiekalle WFS (alphaset). pH-arvot voivat kuitenkin vaihdella paljon valimoiden välillä ja valimoiden sisäisesti. pH-arvojen sijoittuminen vaihteluvälille 8,5...11,5 voidaan olettaa sopiviksi arvoiksi. (Sappinen 2019). Tässä tutkimuksessa valimohiekalle WFS määritetyt pH-arvot jäävät alhaisemmaksi, kuin Orkas *et al.* (2001, s.9) tutkimuksessa määritetyt pH-arvot valimoprosessissa olevalle alphaset valimohiekan vesiututeelle.

Taulukko 14. Uunikuivatun valimohiekan WFS pH-arvoja.

| Näyte # | Mittauslämpötila [°C] | pH-arvot [Yksikötön] |
|------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | 22,9 | 9,4 |
| 2 | 22,9 | 9,39 |
| 3 | 22,9 | 9,4 |
| KA. | | 9,40 |

Taulukko 15. Uunikuivaamattoman valimohiekan WFS pH-arvoja.

| Näyte # | Mittauslämpötila [°C] | pH-arvot [Yksikötön] |
|------------|--------------------------|-------------------------|
| 1 | 24,4 | 9,15 |
| 2 | 24,4 | 9,18 |
| 3 | 24,4 | 9,18 |
| KA. | | 9,17 |

Taulukko 16. Alphaset valimohiekalle WFS määritettyjä pH-arvoja vertailututkimuksesta. (Orkas et al. 2001 Taulukko 3, s.9.)

| Koejakson näytteiden pH-arvot vesiuutteelle (alphaset) | | | | |
|--|------------|--------|---------|-----------|
| Näytteenottoaikka | Näyte lkm. | Minimi | Maksimi | Keskiarvo |
| Pullalinja (sekoitin) | 2 | 10,0 | 10,3 | 10,2 |
| Pullalinja (jäähdytin) | 3 | 10,1 | 10,3 | 10,2 |
| Kehäkaavaus (sekoitin) | 3 | 9,8 | 10,2 | 10,0 |
| Kehäkaavaus (jäähdytin) | 3 | 10,2 | 10,2 | 10,2 |
| Siilo | 3 | 9,5 | 9,6 | 9,6 |

5.4 Kapillaarinen vedenimeytyminen

Kapillaarisuudella tarkoitetaan sitä etäisyyttä, johon maan huokosissa oleva vesi nousee vapaan pohjavedenpinnan yläpuolelle pintajännityksen sekä maara-keiden ja veden välisen adheesion, eli aineiden välisen keskinäisen vetovoiman vaikutuksesta. Kapillaarisen vedenimeytymisen (h_c) yksikkönä käytetään metriä [m] tai senttimetriä [cm]. Kapillaarinen nousukorkeus määritettiin Tie- ja vesirakennushallitus (1970, s.47-50) kirjan luvun 1.42 mukaan. Menetelmän tutkimuslaitteistona käytettiin Aalto-yliopiston maa- ja pohja-rakennuslaboratorion kapillaarimetriä.

Kapillaarisen vedenimeytymisen arvoksi määritettiin 0,2 m kahdella näytteellä, likimääräisen määrittelyn jälkeen. Kapillaarisen vedenimeytymisen tulokset valimohiekalle WFS on esitettyä alapuolella olevassa taulukossa (Taulukko 17). Tie- ja vesirakennushallitus (1970, Taulukko 6, s.49), joka on esitetty alapuolella (Taulukko 18) ISO-luokiteltujen maalajien mukaisesti, valimohiekka WFS luokituu kapillaarisen nousukorkeutensa mukaan karkeaksi/keskikarkeaksi hiekaksi (cSa/mSa) kapillaarisen nousukorkeuden ollessa 3...30 cm rajoissa.

Taulukko 17. Valimohiekalle WFS määritettyjä kapillaarisen vedenimeytymisen arvoja.

| Koe (nimi) | Nousukorkeus h_c [m] |
|-----------------------------|---------------------------|
| Likimääräinen määrittäminen | 0,225 |
| Näyte #1 | 0,2 |
| Näyte #2 | 0,2 |

Taulukko 18. Kapillaarinen nousukorkeus eri maalajeissa. (Tie- ja vesirakennushallitus 1970, SFS-EN 14688-1:2018.)

| ISO-luokiteltu maalaji | Symboli | Raekoko [mm] | Kapillaarinen nousukorkeus h_c [m] |
|-----------------------------|---------|-----------------|---|
| Hiekka (karkea/keskikarkea) | cSa/mSa | 0,2...2,0 | 0,03...0,3 |
| Hiekka (hieno) | fSa | 0,06...0,2 | 0,3...1,0 |
| Siltti (hieno) | fSi | 0,002...0,006 | 10...30 |
| Savi | Cl | < 0,002 | 30...300 |

5.5 Vedenläpäisevyys

Vedenläpäisevyydellä tarkoitetaan Darcyn lain mukaan maassa virtaavan veden nopeutta ajan funktiona. Vedenläpäisevyys ilmoitetaan vedenläpäisevyyskertimen k avulla, jonka yksikkö on matka jaettuna ajalla $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$ tai $\left[\frac{\text{cm}}{\text{s}}\right]$. Vedenläpäisevyys määritettiin valimohiekalle mittaamalla veden virtaus vakiopainekokeella. Menetelmänä käytettiin CEN ISO/TS 17892-11:fi:2004 teknistä spesifikaatiota. Vakiopainekokeessa käytettiin Aaltoyliopiston maa- ja pohjarakennuslaboratorion vedenläpäisevyyden vakiopainekoemittauslaitteistoa.

Vakiopainekokeessa määritetty virtaama Q lasketaan seuraavan yhtälön avulla:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1)$$

missä,

ΔV on valitun aikavälin t aikana kerätyn veden määrä koelaitteistosta [m^3]

Δt on vastaava aikaväli [s]

Vakiopainekokeessa vedenläpäisevyyskerroin k lasketaan seuraavan yhtälön avulla:

$$k = \frac{Q \cdot l}{A \cdot h} \quad (2)$$

missä,

h on vedenpinnan korkeuden ero mittaputkissa [m]

l on erotus kahden pisteen välillä (virtauspolku), eli pietsometriputkien etäisyys [m]

Q on näytteen läpi havaintoajassa t virrannut vesimäärä [cm^3]

A on näytteen pinta-ala [cm^2]

Vedenläpäisevyyskerroin k muutetaan lämpötilakorjauskertoimella α vertailulämpötilaan 10°C , joka lasketaan seuraavan yhtälön avulla:

$$k_{10} = \alpha \cdot k \quad (3)$$

missä, vedenläpäisevyyden lämpötilakorjauskerroin α lasketaan seuraavan yhtälön avulla:

$$\alpha = \frac{1,359}{1 + 0,0337 \cdot T + 0,00022 \cdot T^2} \quad (4)$$

missä,

T on veden lämpötila kokeen aikana [$^\circ\text{C}$]

k on vedenläpäisevyyskerroin huoneen lämpötilassa [m/s]

Kapillaarista nousukorkeutta yritettiin myös määrittää valimohiekalle vaihtuvalla painekokeella, mutta valimohiekka osoittautui olevan mittauslaitteiston mittauskyvyn ja järjestyksen ulkopuolella. Vedenläpäisevyysslaskennan arvoja kerättiin vakiopainekokeen aikana viisi kappaletta valimohiekalle WFS ja ne ovat taulukoituna alapuolella olevassa taulukossa (Taulukko 19) vertailulämpötilassa 10°C . Vedenläpäisevyys valimohiekalla vaihtelee kokeen tulosten perusteella välillä suurimmasta pienimpään arvoon vertailulämpötilassa 10°C : $1,033\text{E-}04 \dots 8,932\text{E-}05$. Alapuolella on taulukoituna (Taulukko 20) lisäksi tavanomaisten maa-ainesten vedenläpäisevyysarvoja. Valimohiekalle WFS määritetty vedenläpäisevyys vastaa taulukossa annettuihin arvoihin verrattuna hienoa (fSa) tai karkeaa/keskikarkeaa (cSa/mSa) hiekkaa määritettyjen vedenläpäisevyysarvojen perusteella.

Pietsometriputkien etäisyys sylinterissä (virtauspolku), $l = 60 \text{ mm}$

Sylinterissä olevan näytteen päädyn pinta-ala, $A = 28,274 \text{ cm}^2$

Taulukko 19. Valimohiekalle WFS määritettyjä vedenläpäisevyyden arvoja.

| Koe | ΔV | Δt | $Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}$ | h | $k = \frac{Q \cdot l}{A \cdot h}$ | T | $k_{10} = \alpha \cdot k$ |
|-----|------------|------------|---------------------------------|------|-----------------------------------|----------------------|---------------------------|
| # | [ml] | [s] | [m ³ /s] | [cm] | [m/s] | [$^\circ\text{C}$] | [m/s] |
| 1 | 147 | 60 | 2,450E-06 | 50,6 | 1,027E-04 | 9,8 | 1,033E-04 |
| 2 | 140 | 60 | 2,333E-06 | 55,8 | 8,874E-05 | 10,4 | 8,775E-05 |
| 3 | 133 | 60 | 2,217E-06 | 54,5 | 8,631E-05 | 9,7 | 8,704E-05 |
| 4 | 144 | 60 | 2,400E-06 | 57,5 | 8,857E-05 | 9,7 | 8,932E-05 |
| 5 | 147 | 60 | 2,450E-06 | 60,3 | 8,622E-05 | 8,9 | 8,895E-05 |

Taulukko 20. Maalajien tyypillisiä vedenläpäisevyysarvoja. (Tie- ja vesirakennushallitus 1970, SFS-EN 14688-1:2018.)

| ISO-luokiteltu maalaji | Symboli | Raekoko [mm] | Tyypillinen vedenläpäisevyys k [m/s] |
|-----------------------------|---------|-----------------|---|
| Sora (hieno/keskikarkea) | mGr/fGr | 2,0...20 | 1,00E-2...1,00E-04 |
| Hiekka (karkea/keskikarkea) | cSa/mSa | 0,2...2,0 | 1,00E-2...1,00E-06 |
| Hiekka (hieno) | fSa | 0,06...0,2 | 1,00E-3...1,00E-06 |
| Siltti (hieno) | fSi | 0,002...0,006 | 1,00E-5...1,00E-09 |
| Savi | Cl | < 0,002 | 1,00E-8...1,00E-12 |
| Moreeni | | | 1,00E-6...1,00E-10 |

5.6 Hehkutushäviö

Hehkutushäviöllä tarkoitetaan näytteen sisältämän orgaanisen aineksen määrää painoprosenttina kuivamassasta. Orgaanisen hienoaineksen määrittämismenetelmiä ovat polttomenetelmä, NaOH-menetelmä ja kolometrimenetelmä (Tie- ja vesirakennushallitus 1970, s.25-30). Valimohiekalle WFS polttomenetelmä oli soveltuvin edellä mainituista. Hehkutushäviön määrittäminen toteutettiin polttomenetelmällä ”Maanrakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita – Osa II, kohdan 1.231 mukaan. Menetelmässä näytteen lämpötila nostetaan uunissa korkeaksi, jolloin orgaaninen aine palaa näytteestä. Näyte ensin uunikuivattiin 105° celsiusasteessa keraamisessa näyteastiassa (hehkutusupokkaassa), jonka jälkeen määritettiin näytteen kuivamassa punnitsemalla näyte astian kanssa. Lopuksi näyte laitettiin polttouuniin 800° celsiusasteeseen 1 tunnin ajaksi ja paino määritettiin polton jälkeen. Kokeen näytteinä käytettiin valimohiekkaa alkuperäisessä raekoostumuksessaan.

Hehkutushäviö lasketaan seuraavan yhtälön avulla:

$$H_h = 100 \cdot \frac{W_k - W_h}{W_k - W_t} \quad (5)$$

missä,

H_h on hehkutushäviö [%]

W_k on hehkutusastian ja näytteen paino kuivana [g]

W_h on hehkutusastian ja näytteen paino hehkutettuna [g]

W_t on hehkutusastian paino [g]

Alapuolella on valokuva (Kuva 22) hehkutetusta valimohiekasta WFS, josta ilmenee valimoprosessissa käytettyjen sideaineiden värjäävä vaikutus kvartsihiekalle. Hehkutushäviötä tutkittiin neljästä näytteestä ja hehkutushäviön tulokset ovat taulukoituna (Taulukko 21) kuvan alapuolella valimohiekalle WFS. Valimohiekan WFS hehkutushäviöarvojen vaihteluväli näytteiden kesken vaihteli 1,37...1,44 % välillä.



Kuva 22. Valimohiekka WFS hehkutettuna hehkutusupokkaassa.

Taulukko 21. Valimohiekalle WFS määritettyjä hehkutushäviön tuloksia.

| Näyte # | Hehkutushäviö H_h [%] |
|------------|----------------------------|
| 1 | 1,42 |
| 2 | 1,37 |
| 3 | 1,44 |
| 4 | 1,44 |
| KA. | 1,42 |

5.7 Huokosluvun minimi ja maksimi

Käsitteenä huokoisuus n tarkoittaa maan huokostilavuuden (veden ja ilman yhteenlasketun tilavuuden) ja kokonaistilavuuden suhdetta ilmaistuna prosentteina. Huokoisuus voidaan laskea seuraavan yhtälön avulla:

$$n = \frac{V_h}{V} \cdot 100 \quad (6)$$

missä,

n on huokoisuus [%]

V_h on maa-erän huokostilavuus (veden ja ilman yhteenlaskettu tilavuus) [m^3]

V on saman maa-erän kokonaistilavuus [m^3]

Käsite huokosluku e tarkoittaa maan huokostilavuuden (veden ja ilman yhteenlasketun tilavuuden) ja kiinteän maa-aineksen tilavuuden suhdetta. Huokoisuus ja huokosluku riippuvat toisistaan ja niiden väliseksi riippuvuudeksi voidaan todeta:

$$e = \frac{n}{100 - n} \quad (7)$$

missä,

e on huokosluku

n on huokoisuus [%]

Huokosluvun minimin ja maksimin määrittäminen toteutettiin Kolbuszewskyn menetelmällä, jonka työohje löytyy GLO-85 ”Geotekniset laboratorio-ohjeet” kirjan luvusta 7.32 (Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry 1985, s.48.). Kokeessa ensin määritetään huokosluvun maksimi ja se tapahtuu kaatamalla suppilon avulla hienovaraisesti tutkittavaa ainesta metalliseen sylinteriin mahdollisimman huokoisessa tilassa. Sylinterin täytettyä näytteen massa sylinterissä määritetään. Tällöin tunnetaan näytteen tilavuus löyhässä tilassa, jolloin huokostilavuus on suuri. Huokosluvun minimi määritetään huokosluvun maksiminäytteestä. Näytettä lisätään likimäärin 1/5 huokosluvun minimin määrittämisessä käytettävään metalliseen sylinteriin, jonka pohjalla on huokoskivi ja -paperi. Sylinteriin kaadetaan vettä näytteen yläpinnan tasolle ja näyte tiivistetään käyttämällä täryrautaa 30 kaksoislyönnillä noin 8...10 lyöntiä sekunnissa. Vaihe toistetaan lopulle näytteelle, kunnes sylinterissä on 5 tiivistettyä kerrosta näytteestä. Tämän jälkeen sylinteristä imetään huokoskiven avulla vesi ja näytteen päälle asetetaan kansilevy. Näytettä täräytetään 5...6 täryraudan kaksoisiskulla ja kansilevyä kopautetaan kevyesti. Kansilevyn ja sylinterin yläreunan välinen etäisyys mitataan kolmesta kohdasta näytteen keskimääräisen korkeuden määrittämiseksi.

Valimohiekalle WFS määritettiin huokosluvun minimi- ja maksimiarvoja sekä huokoisuuden minimi ja maksimiarvoja yhteensä neljästä näytteestä ja ne ovat taulukoituna alapuolella (Taulukko 22). Valimohiekka WFS (alphaset) on huokoinen materiaali tiiviissä tilassa. Rakeisuuskäyrän mukaan huokoisuus tiiviissä tilassa selittyy vähäisen hienoainoksen ollessa mitätön. Valimohiekka WFS rakeisuus on katkaistu valmistusvaiheessa hiekan jalostusprosessissa ja valimopöly eliminoitu valimoprosessin päätteeksi. Helenlund (1979, s.34) (Taulukko 23) mukaan valimohiekka WFS lukeutuu huokosluvun ja huokoisuuden perusteella hiekaksi ja soraksi.

Taulukko 22. Valimohiekalle WFS määritettyjä huokosluvun ja huokoisuuden minimi ja maksimi arvoja.

| Koe # | Huokosluku e [Yksikötön] | | Huokoisuus n [%] | |
|----------|-------------------------------|-------|-----------------------|-------|
| | MIN. | MAKS. | MIN. | MAKS. |
| 1 | 0,59 | 0,84 | 37,2 | 45,6 |
| 2 | 0,59 | 0,85 | 37,3 | 46,0 |
| 3 | 0,59 | 0,84 | 37,2 | 45,6 |
| 4 | 0,59 | 0,85 | 37,0 | 45,9 |
| K.A. | 0,59 | 0,84 | 37,2 | 45,8 |

Taulukko 23. Huokoisuuden ja huokosluvun vaihtelut eri maalajeissa. (Helenelund 1979, Taulukko 1, s.34.)

| Maalaji | Huokosluku e [Yksikötön] | Huokoisuus n [%] |
|----------------|-------------------------------|-----------------------|
| Hiekka ja sora | 0,3...0,8 | 25...45 |
| Kiinteä savi | 0,7...1,5 | 40...60 |
| Löyhä savi | 1,5...3,0 | 60...75 |
| Lieju ja turve | 2,0...20 | 65...95 |

5.8 Rasialeikkauskoe

Rasialeikkauskoe on koemenetelmä, jolla voidaan määrittää tutkittavan materiaalin leikkauslujuus. Tavanomaisin murtumismekanismi maa-ainekselle maaperässä on leikkausmurtuminen. Leikkauslujuuden tuntemista tarvitaan suunnittelussa perustusten kantavuuden, maapohjan stabiliteetin (esimerkiksi luiskien kaltevuuden suunnitteluun) ja rakenteisiin kohdistuvan maanpaineen laskemiseen. Rasialeikkauskokeella määritettävät parametrit tutkittavalle materiaalille ovat kitkakulma (ϕ), jonka yksikkö on $[\circ]$ ja koheesio (c), jonka yksikkö on voima jaettuna pinta-alalla $\left[\frac{\text{kN}}{\text{m}^2}\right]$ tai [kPa]. Koesarjat tutkittavalle materiaalille sisältävät keskenään identtiset näytteet, joita kutakin esikuormitetaan ensin tietyllä pystysuuntaisella kuormalla, jota kutsutaan konsolidaatio-vaiheeksi tai esikonsolidoinniksi. Konsolidaatio-vaiheessa näytteen painumista seurataan näytteen yläpuolelle asennetun pystysuuntaisen siirtymäanturin avulla. Näytteen saavutettua konsolidoitunut tila, aloitetaan kokeen toinen vaihe, näytteen vaakasuuntainen kuormittaminen, jota mitataan vaakasuuntaisen voima-anturin ja vaakasiirtymäanturin avulla. Rasialeikkauskoe toteutettiin eurooppalaisen standardin SFS-EN ISO 17892-10:2019 mukaisesti Aalto-yliopiston pohjarakennuslaboratorion rasialeikkauskoelaitteistolla. Leikkausnopeus, eli nopeus jollakoelaitteiston rasiat liikkuva toisiaan vasten 0,5 mm/min.

Rasialeikkauskokeella tutkittiin kaksi koesarjaa valimohiekalle WFS. Ensimmäinen koesarja toteutettiin huoneen lämmössä olleelle valimohiekalle WFS ilman tavoitteellista vesipitoisuutta ja toinen tavoitteellisella vesipitoisuudella 14 % valmistetulle valimohiekalle WFS. Tulokset koesarjoille on taulukoituna alapuolella (Taulukko 24), jossa lisäksi tiiviysaste näytteille. Rasialeikkauskokeiden muodonmuutosmaksimit olivat 0,02 ensimmäisessä koesarjassa ja toisessa koesarjassa välillä 0,01...0,02. Yksityiskohtaisemmat tiedot molempien koesarjojen koetuloksista ovat esitettynä liitteessä 2.

Taulukko 24. Valimohiekan WFS rasialeikkauskokeiden tuloksia.

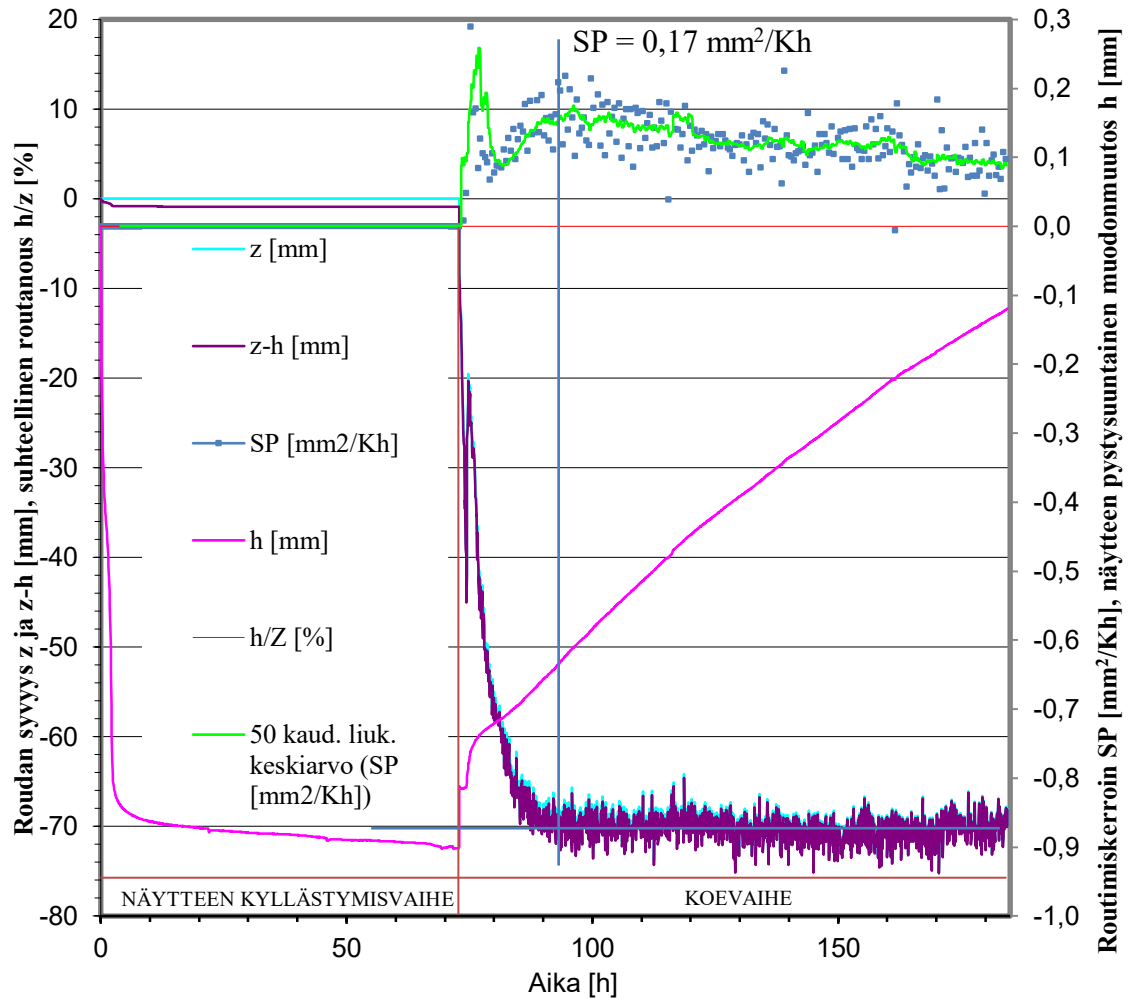
| Koesarja | Näytteiden lopullinen vesipitoisuus w_{FI} [%] | Kitkakulm. ϕ [\circ] | Koheesio c [kPa] | Tiiviysaste parannetusta proctor-tiivyydestä [%] | Muodonmuutos maks. ε |
|----------|---|-------------------------------------|--------------------------|--|-------------------------------------|
| # | | | | | |
| 1 | 0,2...0,3 | 40,08 | 8,3 | 98,2...99,8 | 0,02 |
| 2 | 13,7...13,9 | 38,43 | 9,7 | 93,5...94,6 | 0,01...0,02 |

5.9 Routanousukoe

Roudalla tarkoitetaan rakentamisen kannalta epäedullista ilmiötä, jossa maa-aineksessa oleva huokosvesi jäätyy (noin 0 °C lämpötilassa) ja aiheuttaa maakerroksen jäätyminen. Fysikaalisesti ilmaistuna, veden jäätyminen seurauksena maaperässä tapahtuu veden laajeneminen sen huokosissa, joka puolestaan aiheuttaa tilavuuden muutoksen ja sen seurauksena maaperä alkaa kohota. Maaperässä maa-aineksen ominaisuudet, kuten raekoko ja sen jakauma, vaikuttavat jäätyislämpötilaan. Roudasta johtuvaa maaperän kohoamista kutsutaan routanousuksi. Routiminen on epäedullisuutensa vuoksi huomioitava rakenteiden suunnittelussa. Routimisen suuruus riippuu materiaalista, vedenmäärästä huokosissa, olosuhteista ja pakkasmäärästä. (Repo 2016, s.3.). Routanousukokeella määritetään luonnontilaisen tai muottiin rakennetun maanäytteen routimiskerroin (SP), joka kuvaa maan routivuuden määrällistä voimakkuutta. Routimiskertoimen (SP) yksikkö on $[\frac{\text{mm}^2}{\text{Kh}}]$, joka on routanousunopeuden ja jäätyneen kerroksen lämpötilagradientin suhde. Routanousun avulla voidaan edelleen arvioida routanousun aiheuttamaa rakenteen rikkoutumisriskiä.

Routanousukokeessa tutkitaan vedellä kyllästetyn näytteen routimisherkkyyttä, mallintamalla koejärjestelylaitteiston avulla laboratorio-olosuhteissa luontaista routivuusolosuhdetta. Routanousukoe toteutettiin VTT:n (VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka 2001) menetelmäkuvausten mukaisesti Aalto-yliopiston routanousukoelaitteistolla. Routanousukokeessa maanäytteen yläosa jäädytetään ja alaosa pidetään sulana. Kokeen aikana seurataan mm. routarajan syvyyttä ja näytteen korkeuden muutosta (routanousua).

Routanousukoe toteutettiin yhdellä näytteellä ja kokeeseen valmistetun valimohiekkanäytteen kuivairtotilavuuspaino oli $\rho_d = 1,662 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, mikä on 96 % valimohiekalle WFS määritetystä parannetusta proctor-tiiviyydestä. Näytteen tavoite vesipitoisuus $w = 15,5 \%$. Näyte jäädytettiin pakastimessa ja asennettiin esijäädytettynä routanousukoelaitteistoon. Näytteen sulamisen seurauksena, kyllästymisvaiheen aikana, näyte tiivistyi 0,9 mm. Routanousukokeen aikana näytteessä tapahtui veden jäätyminen aiheuttamaa luonnollista laajenemista ja näytteen korkeus palautui lähes samaan korkeuteen, kuin se oli näytteen kyllästyksen alkaessa. Alapuolella on esitettynä routanousukokeen kuvaaja (Kuva 23). Routanousukokeen routimiskertoimen SP arvojen routivuusluokitus on esitetty alapuolella olevassa taulukossa (Taulukko 25). Taulukon mukaan valimohiekka WFS on routimaton materiaali, koska $SP = 0,17 \frac{\text{mm}^2}{\text{Kh}} (< 0,5 \frac{\text{mm}^2}{\text{Kh}})$.



Kuva 23. Valimohiekan WFS routanousukokeen kuvaaja.

Taulukko 25. Routivuusluokitus routimiskertoimeen (SP) perustuen. (Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT 1989, Taulukko 1, s.21.)

| Routivuusluokka | Routaantumiskerroin SP [mm^2/Kh] |
|--------------------------------|--|
| Routimaton (negligible) | $< 0,5$ |
| Lievästi routiva (low) | $0,5 \dots 1,5$ |
| Routiva (medium) | $1,5 \dots 3,0$ |
| Voimaakkaasti routiva (strong) | $> 3,0$ |

6 Laboratoriokokeet sidotulle valimohiekalle WFS

Tässä luvussa käydään läpi sidottujen valimohiekkaseosten valmistusperiaatteet, puristeluuskokeen menetelmä, tulokset eri runko- ja sideaineseoksille sekä pH-arvojen määrittäminen 31 vrk ikäisille näytteille, joissa runkoaineena valimohiekka WFS ja kalliomurske KaM 0/20. Lisäksi sideaineille tehtyjen taivutus- ja puristuskestävyyskokeiden tulokset käsitellään luvussa 6.4 sekä pH-arvot luvussa 6.5.

6.1 Koekappaleiden valmistus, tiivistäminen ja säilytys

Tutkimuksessa valimohiekasta tehtyjä sidottuja koekappaleita valmistettiin kolmella eri runkoaineseoksella: WFS/WFSR (100%), WFS + Kivituhka ja WFS + Kalliomurske. Sideaineena tutkimuksessa käytettiin valimohiekan WFS kanssa pikasementtiä (CEM I), kivihiilen polton lentotuhkaa (KPLT), Ecolan uusiosideainetta (ECO), biopolton lentotuhkaa (BPLT) ja kalkkisementtiä (KC50). Kalkkisementillä (KC50) sidottu seos reagoi lujittumisen aikana voimakkaasti valimohiekan WFS kanssa ja koekappaleet halkeilivat, jonka seurauksena niitä ei voitu kuormittaa. Kalkkisementti suljettiin pois sideaineena tutkimuksista tämän seurauksena. Kivihiilen polton lentotuhkaan (KPLT) ja biopolton lentotuhkaan (BPLT) lisättiin pikasementtiä (CEM I) aktivaattoriksi. Pikasementillä (CEM I) sidottujen runkoaineseosten koetulokset toimivat tutkimuksessa referenssinä antaen vertailuarvoja muilla sideaineilla sidottujen runkoaineseosten koetuloksille.

Sideainepitoisuudeksi koekappaleseoksiin valittiin suhteittamalla kokemukseräisesti pohjautuen Aalto-yliopiston aikaisempiin tutkimuksiin kivituhkalle KaM 0/4 ja päällysrakenteen stabilointiohjeen viitearvojen mukaisesti. Päällysrakenteen stabilointiohjeessa sementin määräksi sementtistabiloidulle seokselle ohjeistetaan määräksi 2,5...7,0 p-% ja masuunihiekalla stabiloidulle seokselle 10...15 p-% mikäli aktivaattoria ei käytetä ja 4...10 p-% mikäli käytetään aktivaattoria. Aktivaattorin määräksi suositellaan 0,5...1,5 p-%. Sementillä stabiloitujen seosten suositellulta viitearvoväliltä valittiin 4 p-% pikasementille kaikissa runkoaineseoksissa ja masuunihiekalle annettuja viitearvovälejä skaalattiin muille seoksille aktivaattorilla ja ilman aktivaattoria. (Melander 2018, Zhang *et al.* 2019b.)

Ensimmäisen seossarjan koekappalesarjojen sideainemäärät valittiin kokemukseräisesti. Kullekin sideaineelle valittiin kolme seossuhdetta, joista keskimääräinen seos määritettiin parannetulla proctor-menetelmällä eurooppalaisen standardin SFS-EN 13286-2:2011 työohjeen mukaisesti. Parannetulla-proctorilla määritetyt tulokset seokselle skaalattiin analyttisesti alemmalle ja korkeammalle sideainemäärälle. Ensimmäisten seosten tiiviysarvot taulukoituna (Taulukko 26). Toisen runkoaineseoksen valimohiekka + kivituhka + sideaine seokselle tehtiin määrittäminen maksimikuivairtoteiheydestä ja optimivesipitoisuudesta analyttisesti, hyödyntäen materiaaleille erikseen määritettyjä maksimikuivairtoteiheyksiä ja optimivesipitoisuuksia sekä valimohiekalle että kivituhkalle, ja ne on taulukoituna (Taulukko 27). Todellisuudessa arvot voivat vaihdella, mutta materiaalin vähäisyyden vuoksi tutkimuksessa turvauduttiin lineaarisesti käyttäytyvään oletukseen tiiviyydessä ja vesipitoisuudessa. Kolmannen runkoaineseossarjan valimohiekka + kalliomurske + sideaine maksimikuivairtoteiheyden ja vesipitoisuuden määrittäminen ICT-kiertotiivistimellä, jonka menetelmäkuvaus löytyy (Tiehallinto 2001, s.12) ohjeesta. Kiertotiivistimen liikekulma 22 mrad, aksiaalipaine 600 kPa ja pyörintänopeus 26,2 rpm. Tiiviystulokset on taulukoituna sekä kiertotiivistysmäärät (työkierrokset) seoksille (Taulukko 28).

Taulukko 26. Valimohiekalle WFS + sideaineseoksille määritetyt tiiviysarvot.

| Runkoaine | Sideaine | Vesipitoisuus [%] | Kuivairtitiheys [Mg/m ³] | Menetelmä |
|-----------|-------------|----------------------|---|--------------------|
| WFS | CEM I (4%) | 13,9 | 1,77 | Parannettu proctor |
| WFS | KPLT (12%) | 12,1 | 1,79 | Parannettu proctor |
| WFS | ECOLAN (6%) | 13,0 | 1,78 | Parannettu proctor |
| WFS | BPLT (12%) | 13,5 | 1,78 | Parannettu proctor |
| WFS | KC50 (6%) | 12,9 | 1,78 | Parannettu proctor |

Taulukko 27. Valimohiekalle WFS + kivituhkalle KaM 0/4 + pikasementtiseoksille määritetyt tiiviysarvot.

| Runkoaine | Sideaine | Vesipitoisuus [%] | Kuivairtitiheys [Mg/m ³] | Menetelmä |
|------------------------------|---------------|----------------------|---|--|
| WFS (50%) + KaM 0/4 (50%) | CEM I (4%) | 11,6 | 1,94 | Analyttisesti WFS+CEM I ja Kivituhka 0/4 parannetulla proctorilla määritetyistä arvoista |
| WFS (25%) + KaM 0/4 (75%) | CEM I (4%) | 10,5 | 2,03 | |

Taulukko 28. Valimohiekalle WFS + kalliomurskeelle KaM 0/20 + pikasementtiseoksille määritetyt tiiviysarvot.

| Runkoaine | Sideaine | Vesipitoisuus [%] | Kuivairtitiheys [Mg/m ³] | ICT-kierto- tiivistysmäärä [r] |
|-------------------------------|--|----------------------|---|-----------------------------------|
| WFS (25%) + KaM 0/20 (75%) | CEM I (4%) | 5,31 | 2,21 | 512 + 256 = 768 |
| WFS (25%) + KaM 0/20 (75%) | KPLT (10%) + AKT. CEM I (2%) | 5,29 | 2,20 | 256 + 256 = 512 |
| WFS (25%) + KaM 0/20 (75%) | ECOLAN (8%) | 4,8 | 2,26 | 512 + 256 = 768 |
| WFS (25%) + KaM 0/20 (75%) | BPLT (8%) + AKT. CEM I (2%) | 5,11 | 2,23 | 512 + 256 = 768 |

Lähtötilanteessa ensimmäisessä seossarjassa käytettiin runkoaineena valimohiekkaa WFS (100%) ja sideaineena pikasementtiä (CEM I), kivihiilen polton lentotuhkaa aktivaattorilla (KPLTA), Ecolan uusiosideainetta (ECO) ja biopolton lentotuhkaa (BPLT). Biotuhkan puristuslujuus jäi alhaiseksi, joten se toteutettiin uudestaan lisäten sekaan aktivaattori (BPLTA). Lisäksi tutkittiin elvytetty valimohiekka WFSR (100%), jossa sideaineena pikasementti (CEM I). Elvytetyn valimohiekan seokselle tiiviysarvoina käytettiin valimohiekalle WFS ja pikasementille (CEM I) määritettyjä arvoja, johtuen vähäisestä materiaalmäärästä. Koesarjojen koekappaleiden valmistustiedot taulukoituna alapuolella (Taulukko 29).

Taulukko 29. Valimohiekan WFS/WFSR + sideaineseosten valmistustiedot.

| Seos (tunnus) | Runkoaine [%] | Sideaine [p-%] | Kappaleet (lukumäärä) | Vesi [%] | Tavoite tiiviyssaste (p. proctor) |
|------------------|------------------|-------------------|--------------------------|-------------|---|
| WFS+CEM-1 | | CEM I (4%) | 3 | 14 | 96 % |
| WFS+KPLTA-1 | | KPLT+A (9%+1%) | 3 | 12 | |
| WFS+KPLTA-2 | | KPLT+A (11%+1%) | 3 | 12 | 96 % |
| WFS+KPLTA-3 | | KPLT+A (13%+1%) | 3 | 12 | |
| WFS+ECO-1 | WFS (100%) | ECOLAN (4%) | 3 | 13 | |
| WFS+ECO-2 | | ECOLAN (6%) | 3 | 13 | 96 % |
| WFS+ECO-3 | | ECOLAN (8%) | 3 | 13 | |
| WFS+BPLT-1 | | BPLT (10%) | 3 | 13 | |
| WFS+BPLT-2 | | BPLT (12%) | 3 | 13 | 96 % |
| WFS+BPLT-3 | | BPLT (14%) | 4 | 13 | |
| WFS+BPLTA-1 | | BPLT+A (11%+1%) | 4 | 13 | 96 % |
| WFSR+CEM-1 | WFSR (100%) | CEM I (4%) | 3 | 14 | 96 % |

Toisessa runkoaineseossarjassa valimohiekan sekaan sekoitettiin kivituhkaa KaM 0/4. Tutkitut seokset olivat WFS (50 %) + KaM 0/4 (50 %) ja WFS (25 %) + KaM 0/4 (75 %). Molempien seosten sideaineena käytettiin pikasementtiä (CEM I). Toisten koesarjojen koekappaleiden valmistustiedot löytyvät seuraavasta taululukosta (Taulukko 30).

Taulukko 30. Valimohiekan WFS + kivituhkan KaM 0/4 + pikasementtiseosten valmistustiedot.

| Seos | Runkoaine | Sideaine | Kappaleet | Vesi | Tavoite tiiviyysaste |
|------------------|------------------------------|---------------|-----------|------|-------------------------|
| (tunnus) | [%] | [p-%] | (lukum.) | [%] | (analyyt.) |
| WFS+KaM0-4+CEM-1 | WFS (50%) + KaM 0/4 (50%) | CEM I (4%) | 3 | 11,6 | 90 % |
| WFS+KaM0-4+CEM-2 | WFS (25%) + KaM 0/4 (75%) | CEM I (4%) | 3 | 10,4 | 89 % |
| WFS+KaM0-4+CEM-3 | WFS (50%) + KaM 0/4 (50%) | CEM I (4%) | 3 | 11,6 | 96 % |
| WFS+KaM0-4+CEM-4 | WFS (25%) + KaM 0/4 (75%) | CEM I (4%) | 3 | 10,4 | 96 % |

Kolmannessa runkoaineseossarjassa valimohiekan sekaan sekoitettiin kalliomursketta KaM 0/20. Tutkittu runkoaineseos oli WFS (25 %) / KaM 0/4 (75 %) ja sideaineina käytettiin pikasementtiä (CEM I), kivihiilen polton lentotuhkaa aktivaattorilla (KPLTA), Ecolan uusiosideainetta (ECO) ja biopolton lentotuhkaa aktivaattorilla (BPLTA). Kolmansien koesarjojen koekappaleiden valmistustiedot löytyvät taulukosta (Taulukko 31).

Taulukko 31. Valimohiekan WFS + kalliomurskeen KaM 0/20 + sideaineseosten valmistustiedot.

| Seos | Runkoaine | Sideaine | Kappaleet | Vesi | Tavoite tiiviyysaste |
|---------------------|-------------------|--------------------|-------------|------|-------------------------|
| (tunnus) | [%] | [p-%] | (lukumäärä) | [%] | (ICT) |
| WFS+KaM0-20+CEM-1 | | CEM I (4%) | 3 | 6 | |
| WFS+KaM0-20+CEM-2 | | | 3 | 6 | |
| WFS+KaM0-20+KPLTA-1 | | KPLT+A (10%+2%) | 3 | 6 | |
| WFS+KaM0-20+KPLTA-2 | WFS (25%) + | | 3 | 6 | 96 % |
| WFS+KaM0-20+ECO-1 | KaM 0/20 (75%) | ECOLAN (8%) | 3 | 6 | |
| WFS+KaM0-20+ECO-2 | | | 3 | 6 | |
| WFS+KaM0-20+BPLTA-1 | | BPLT+A (8%+2%) | 3 | 6 | |
| WFS+KaM0-20+BPLTA-2 | | | 3 | 6 | |

Kaikki sideaineiden avulla sidotut koekappaleet valmistettiin ICT-kiertotiivistimellä 120 mm korkeuteen 100 mm halkaisijalla puristuslujuuskoetta varten kaikissa koesarjoissa. Koekappaleet säilytettiin jälkihoitohuoneessa noin 20° celsiusasteessa 95% kosteuspitoisuudessa muovikalvon alla. Massojen sekoitus tapahtui ensimmäisissä ja toisissa koesarjoissa, valimohiekan WFS/WFSR + sideaine ja valimohiekan WFS + kivituhka KaM 0/4 + sideaine seoksissa käyttäen Aalto-yliopiston betonilaboratorion sekoitinlaitetta. Kolmansissa koesarjoissa valimohiekan WFS + kalliomurskeen KaM 0/20 + sideaine seokset sekoitettiin käsin vapaapudotus periaatteella sangossa, johtuen kalliomurskeen suuren raekoon soveltumattomuudesta koneseoitukseen. Kaikissa seoksissa runko- ja sideaineet sekoitettiin ensin keskenään kuivana, ja lopuksi ainesosien ollessa sekoittuneena tasaisesti, seoksiin lisättiin vesi sekoittaen tasaiseksi seokseksi. Koekappalesarjojen tarkemmat tiedot löytyvät liitteistä 4, 5 ja 6.

6.2 Puristuslujuuskoe

Puristuslujuus on tyypillinen suunnitteluparametri materiaalille rakentamisessa ja sen yksikkö on pascal [Pa], joka voidaan ilmaista myös yksikkönä voima jaettuna pinta-alalle [$\frac{N}{mm^2}$]. Puristuslujuuden tuntemisen avulla voidaan arvioida materiaalin soveltuvuutta ja toimivuutta rakenteessa. Alapuolella valokuva puristuslujuuskokeesta, 28 vuorokauden ikäiselle koekappaleelle, jossa runkoaineena valimohiekka WFS ja kalliomurske KaM 0/20 Ecolan uusiosideaineella sidottuna. Puristuslujuus määritettiin tutkimuksessa koekappaleille käyttäen Aalto-yliopiston Zwick & Roell yksiaksiaalista puristuskoelaitetta eurooppalaisen standardin SFS-EN 13286-41:2003 mukaan. Puristuslaitteen kuormitusnopeudeksi ohjelmoitiin 1,2 mm/min ja koekappaleet puristettiin murtoon asti.

Yksiaksiaalisen puristuslujuuskokeen tulokset eri sideaineseoksille on avattuna alaluvuissa 6.2.1, 6.2.2 ja 6.2.3. Puristuslujuuden määrittämisessä eri seoksille saatuja arvoja verrataan tiehallinnon päällysrakenteen stabilointiohjeen (Tiehallinto 2007a) sidotuille seoksille asetettuihin raja-arvoihin tierakenteen kantavalle kerrokselle. Päällysrakenteen stabilointiohjeessa stabiloinnissa käytettäviksi sideaineiksi luetellaan bitumi, sementti ja masuunihiekka. Tässä tutkimuksessa referenssinä käytettyjä, pikasementillä sidottujen seosten puristuslujuuden arvoja verrataan sementille asetettuihin raja-arvoihin ja muita seoksia masuunihiekalle asetettuihin raja-arvoihin, jotka ovat taulukoituna alapuolella olevassa taulukossa (Taulukko 32). Alapuolella on kuva (Kuva 24) ecolan sideaineella sidotusta WFS + KaM 0/20 koekappaleesta puristuslujuuskoejärjestelyssä.



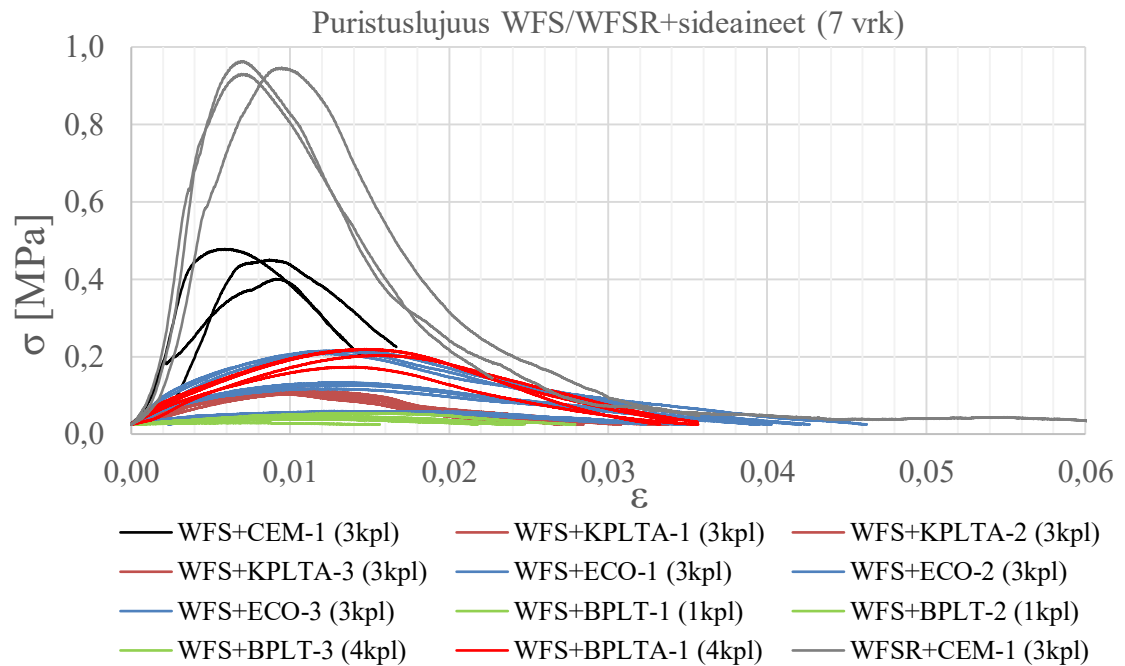
Kuva 24. Valimohiekka WFS + KaM 0/20 + Ecolan uusiosideaineella sidottu puristuslujuuskoekappale 28 vuorokauden iässä.

Taulukko 32. Sideaineilla sidottujen seosten puristuslujuuksien raja-arvoja. (Tiehallinto 2007a, s.38-39.)

| Stabilointiseos | Puristuslujuus [MPa] | | |
|---|----------------------|-----------|-----------|
| | 7 vrk | 28 vrk | 91 vrk |
| Sementtistabilointi (2,5...7,0 p-%) | 3...8 | 5...13 | - |
| Masuunihiekkastabilointi (ilman aktivaattoria) | - | 0,5...1,0 | 1,0...3,0 |
| Masuunihiekkastabilointi (aktivaattori: 0,5...1,3 p-%) | - | 1,0...2,0 | 1,5...3,0 |
| Masuunihiekkastabilointi (aktivaattori: > 1,3 p-%) | - | 1,0...2,0 | 2,0...3,0 |

6.2.1 Valimohiekka WFS/WFSR + sideaine tulokset

Tässä luvussa esitetään puristuslujuuskuvaajat ja puristuslujuuden vaihtelut taulukoituna 7 vuorokauden ikäisille valimohiekka WFS (100%) + sideaine seoksille. Koekappaleiden ja seosten valmistustiedot löytyvät luvun 6.1 alta taulukoista (Taulukko 26, Taulukko 29). Puristuslujuusarvot ovat esitettynä alapuolella olevassa kuvaajassa (Kuva 25). Kuvaajien aloituspisteet on korjattu alkamaan 0,025 MPa kohdalta, jotta ne olisivat vertailukelpoisia keskenään. Lisäksi kuvaajan alapuolella on taulukoituna tulokset (Taulukko 33).



Kuva 25. Valimohiekan WFS + sideaineseoksien puristuslujuuskuvaajat (7 vrk).

Taulukko 33. Valimohiekan WFS + sideaineseoksien puristuslujuustiedot (7 vrk).

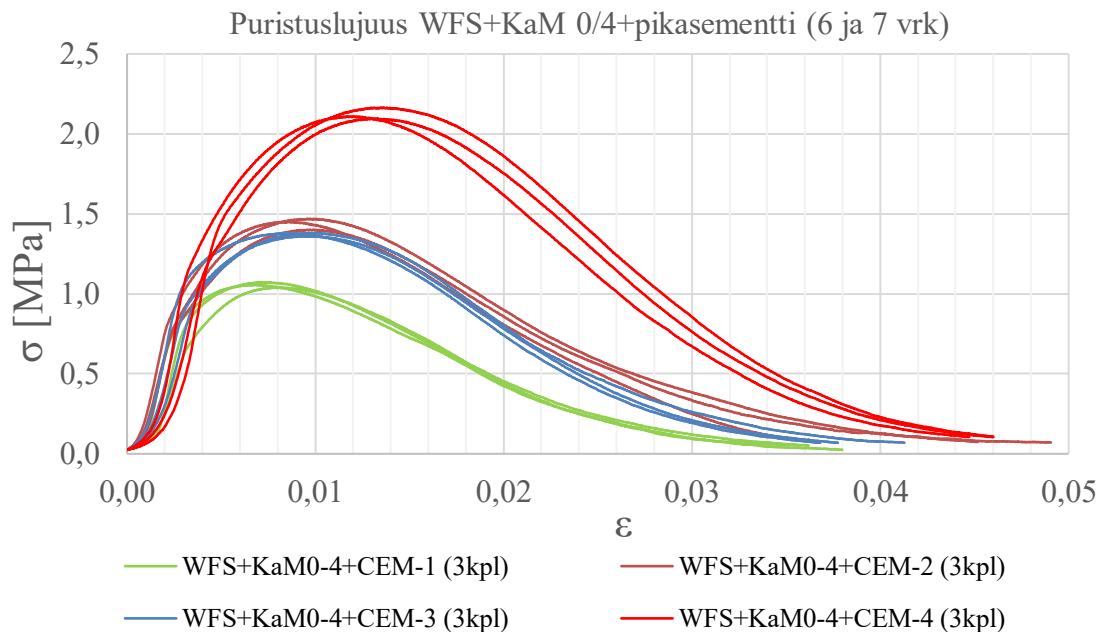
| Seos (tunnus) | Koekappale (lukumäärä) | Puristuslujuus [kPa] | | | Ikä (vrk) |
|------------------|---------------------------|----------------------|---------|-----------|--------------|
| | | Minimi | Maksimi | Keskiarvo | |
| WFS+CEM-1 | 3 | 401 | 478 | 443 | 7 |
| WFS+KPLTA-1 | 3 | 111 | 116 | 114 | |
| WFS+KPLTA-2 | 3 | 103 | 117 | 110 | |
| WFS+KPLTA-3 | 3 | 99 | 117 | 107 | |
| WFS+ECO-1 | 3 | 59 | 64 | 61 | |
| WFS+ECO-2 | 3 | 118 | 133 | 126 | |
| WFS+ECO-3 | 3 | 208 | 216 | 213 | |
| WFS+BPLT-1 | 1 | 30 | 30 | 30 | |
| WFS+BPLT-2 | 1 | 38 | 38 | 38 | |
| WFS+BPLT-3 | 4 | 44 | 54 | 47 | |
| WFS+BPLTA-1 | 4 | 174 | 220 | 204 | |
| WFSR+CEM-1 | 3 | 931 | 963 | 947 | |

Puristuslujuuskuvaajista (Kuva 25) on pääteltävissä, että korkein puristuslujuus saavutettiin termisesti elvytettyllä valimohiekkaseoksella WFSR+CEM-1 (väri=tummanharmaa). Vastaavasti valimohiekka WFS+CEM-1 seokselle saavutettiin korkein puristuslujuus, kun käytetään sideaineena pikasementtiä (väri=musta). Heikoin puristuskestävyys oli seoksilla WFS+BPLT, jossa oli sideaineena biotuhka (väri=vihreä) ilman aktivaattoria. Valimohiekkaseos, joissa oli sideaineena biotuhka aktivaattorilla WFS+BPLTA-1, oli valimohiekkaseoksista toiseksi kestävin seos (väri=punainen), Ecolan uusiosideaine (väri=sininen) WFS+ECO-3 seoksen kanssa. Muut seokset sijoittuivat edellä mainittujen

seosten väliin. Kaikkien seosten puristuslujuuskestävyys oli < 1 MPa 7 vuorokauden ikäisenä, mikä indikoi, että seokset eivät täytä sidotuille seoksille asetettuja puristuslujuusvaatimuksia esitettynä taulukossa (Taulukko 32). Alhaisen puristuslujuuden vuoksi seosta päätettiin muuttaa lisäämällä runkoaineeksi valimohiekan WFS sekaan kivituhkaa KaM 0/4.

6.2.2 Valimohiekka WFS + KaM 0/4 + pikasementti tulokset

Tässä luvussa esitetään puristuslujuuskuvaajat ja puristuslujuuden vaihtelut taulukoituna 7 ja 6 vuorokauden ikäisille valimohiekka WFS (50% / 25%) + kivituhka KaM 0/4 (50 % / 75%) + pikasementti CEM I (4 p-%) seoksille. Koekappaleiden ja seosten valmistustiedot löytyvät luvun 6.1 alta taulukoista (Taulukko 27, Taulukko 30). Puristuslujuusarvot on esitettynä alapuolella olevassa kuvaajassa (Kuva 26). Kuvaajien aloituspisteet on korjattu alkamaan 0,025 MPa kohdalta, jotta ne olisivat vertailukelpoisia keskenään. Lisäksi kuvaajan alapuolella on taulukoituna tulokset (Taulukko 34).



Kuva 26. Valimohiekan WFS + kivituhkan 0/4 + pikasementtiseoksien puristuslujuuskuvaajat (6 ja 7 vrk).

Taulukko 34. Valimohiekan WFS + kivituhkan 0/4 + pikasementtiseoksien puristuslujuustiedot (6 ja 7 vrk).

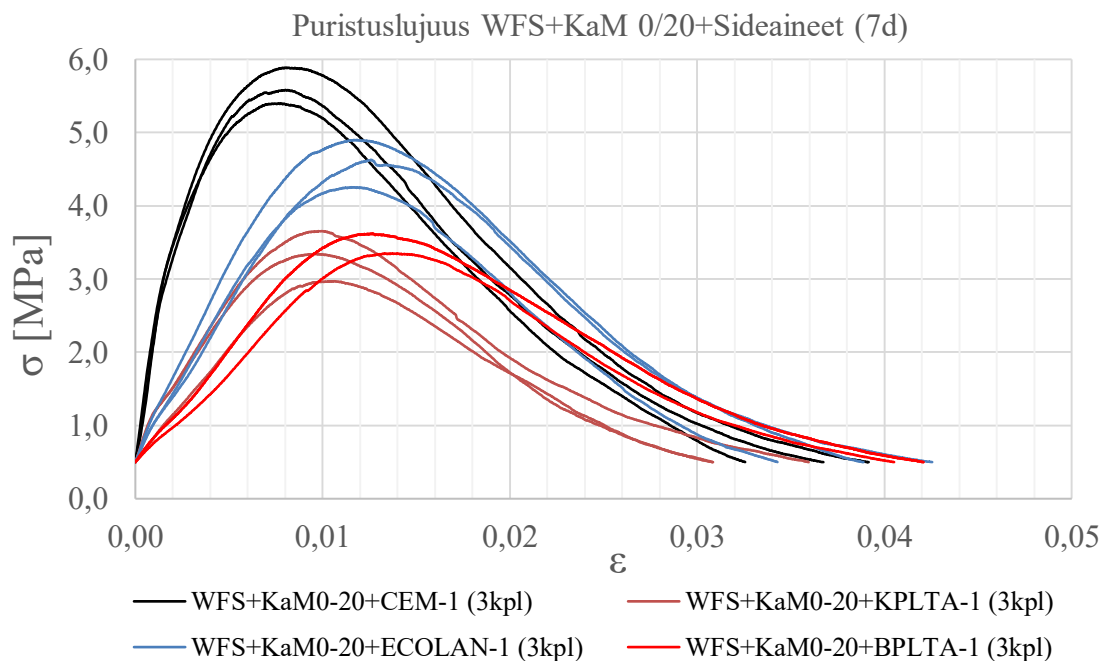
| Seos (tunnus) | Koekappale (lukumäärä) | Puristuslujuus [MPa] | | | Ikä (vrk) |
|------------------|---------------------------|----------------------|---------|-----------|--------------|
| | | Minimi | Maksimi | Keskiarvo | |
| WFS+KaM0-4+CEM-1 | 3 | 1,04 | 1,07 | 1,06 | 7 |
| WFS+KaM0-4+CEM-2 | 3 | 1,40 | 1,47 | 1,44 | |
| WFS+KaM0-4+CEM-3 | 3 | 1,36 | 1,38 | 1,37 | |
| WFS+KaM0-4+CEM-4 | 3 | 2,10 | 2,16 | 2,12 | 6 |

Koekappaleseosten ikäero oli 1 vuorokausi, joka ilmenee taulukosta (Taulukko 34). Suurimman puristuslujuuden saavutti 6 vuorokauden ikäinen seos WFS+KaM0-4+CEM-4

(väri=punainen), jossa runkoaineena on valimohiekka WFS (25%) ja kivituhka KaM 0/4 (75%), 96% tiiviysasteella. Heikoimman puristuslujuuden saavutti 7 vuorokauden ikäinen seos WFS+KaM0-4+CEM-1 (väri=vihreä), jossa runkoaineena on valimohiekka WFS (50%) ja kivituhka KaM 0/4 (50%), 90% tiiviysasteella. Kaikki puristuslujuusarvot jäivät tavoitellusta 3 MPa minimiarvosta (Taulukko 32) sementillä sidotuille valimohiekan ja kivituhkan seoksille. Seosten maksimitiiviysarvot perustuivat analyttiseen olettamukseen runkoaineiden lineaarisesta käyttäytymisestä.

6.2.3 Valimohiekka WFS + KaM 0/20 + sideaine tulokset

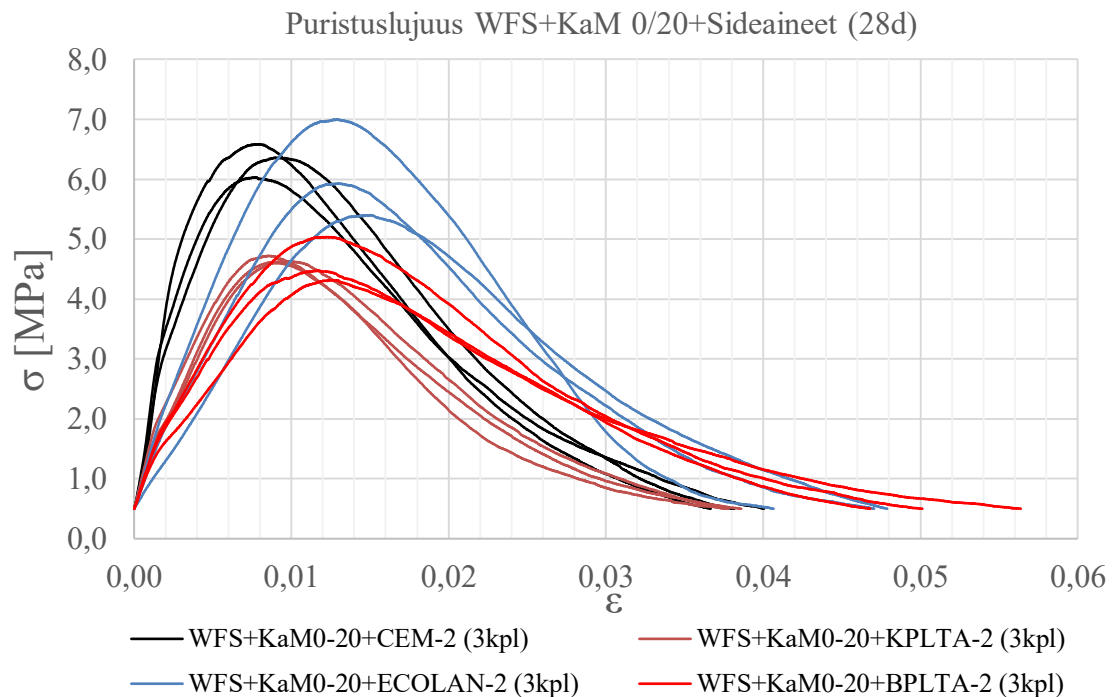
Tässä luvussa esitetään puristuslujuuskuvaajat ja puristuslujuuden vaihtelut taulukoituna 7 ja 28 vuorokauden ikäisille valimohiekka WFS (25%) + kalliomurske KaM 0/20 (75%) + sideaine seoksille. Koekappaleiden ja seosten valmistustiedot löytyvät luvun 6.1 alta taulukoista (Taulukko 28, Taulukko 31). Puristuslujuusarvot ovat esitettynä alapuolella olevissa kuvaajissa 7 ja 28 vuorokauden ikäisille koekappaleille (Kuva 27, Kuva 28). Molempien kuvaajien aloituspisteet on korjattu alkamaan 0,5 MPa kohdalta, jotta ne olisivat vertailukelpoisia keskenään. Lisäksi kuvaajien alapuolella on taulukoituna tulokset (Taulukko 35, Taulukko 36).



Kuva 27. Valimohiekan WFS + kalliomurskeen KaM 0/20 + sideaineseoksien puristuslujuuskuvaajat (7 vrk).

Taulukko 35. Valimohiekan WFS + kalliomurskeen KaM 0/20 + sideaineseoksien puristuslujuustiedot (7 vrk).

| Seos (tunnus) | Koekappale (lukumäärä) | Puristuslujuus [MPa] | | | Ikä (vrk) |
|----------------------|---------------------------|----------------------|---------|-----------|--------------|
| | | Minimi | Maksimi | Keskiarvo | |
| WFS+KaM0-20+CEM-1 | 3 | 5,40 | 5,89 | 5,62 | 7 |
| WFS+KaM0-20+KPLTA-1 | 3 | 2,97 | 3,65 | 3,32 | |
| WFS+KaM0-20+ECOLAN-1 | 3 | 4,25 | 4,90 | 4,59 | |
| WFS+KaM0-20+BPLTA-1 | 3 | 3,35 | 3,62 | 3,50 | |



Kuva 28. Valimohiekan WFS + kalliomurskeen KaM 0/20 + sideaineseoksien puristuslujuuskäyköt (28 vrk).

Taulukko 36. Valimohiekan WFS + kalliomurskeen KaM 0/20 + sideaineseoksien puristuslujuustiedot (28 vrk).

| Seos (tunnus) | Koekappale (lukumäärä) | Puristuslujuus [MPa] | | | Ikä (vrk) |
|----------------------|---------------------------|----------------------|---------|-----------|--------------|
| | | Minimi | Maksimi | Keskiarvo | |
| WFS+KaM0-20+CEM-2 | 3 | 6,03 | 6,58 | 6,33 | 28 |
| WFS+KaM0-20+KPLTA-2 | 3 | 4,61 | 4,72 | 4,65 | |
| WFS+KaM0-20+ECOLAN-2 | 3 | 5,40 | 7,00 | 6,11 | |
| WFS+KaM0-20+BPLTA-2 | 3 | 4,32 | 5,04 | 4,61 | |

Suurin puristuslujuus saavutettiin keskiarvoltaan 7 ja 28 vuorokauden seoksella WFS+KaM0-20+CEM (väri=musta), jossa sideaineena pikasementti CEM I. Ecolan uusiosideaineella (väri=sininen) sidottu seos WFS+KaM0-20+ECO oli toiseksi kestävin ja jatkoi lujittumistaan 7 vuorokauden jälkeen, lähes saavuttaen pikasementillä sidotun seoksen lujuuden keskiarvoltaan 28 vuorokauden ikäisenä. Biopolton tuhalla ja aktivaattorilla sidottu seos WFS+KaM0-20+BPLT (väri=punainen) ja kivihiilen polton lentotuhalla ja aktivaattorilla sidotulla WFS+KaM0-20+KPLTA (väri=ruskea) olivat 7 ja 28 vuorokauden lujuuskehityksessä lähes yhtä kestäviä. Kaikki edellä mainitut, valimohiekan WFS + kalliomurskeen KaM 0/20 + sideaineiden seokset ylittivät tavoitellut puristuslujuuden kantavuusarvot 7 ja 28 vuorokauden ikäisinä sidotuille seoksille annettuihin raja-arvoihin verrattuna (Taulukko 32).

6.3 pH-arvo sidotuille seoksille

pH-arvo valimohiekalle määritettiin Aalto-yliopiston maalaboratorion omalla menetelmällä (Aalto-yliopisto 2017) käyttäen kalibroitua elektronista pH-arvon ilmaisinalaitetta.

Menetelmässä käytetty seosnäyte valmistettiin yhdistämällä hienoksi jauhattua näytettä 20 ml ja 50 ml tislattua vettä seoslasissa, antaen tislattun veden imeytyä näytteeseen 24 h. Imeytyksen jälkeen seos sekoitettiin huolellisesti ja sekoittuneen seoksen pH-arvo mitattiin kalibroidulla ilmaisimella. Koe toteutettiin uunikuivatuille näytteille. pH-arvon määrittäminen toteutettiin 31 vuorokauden ikäisistä puristuslujuuskokeen (28 vrk) koekappaleista, joiden valmistustiedot ovat avattu luvun 6.1 alla taulukossa (Taulukko 31). Puristuslujuuskokeen jälkeen näytteet uunikuivattiin 48h, jonka jälkeen näytteet jauhettiin jauhatinlaitteella hienojakoiseksi näytteeksi. Näytteiksi valittiin 28d puristuslujuuskokeen koesarjojen ensimmäiset koekappaleet kustakin seoksesta ja kustakin määritettiin kolme näytettä. Sideaineille määritetyt pH-arvot ovat taulukoituna alapuolella (Taulukko 37, Taulukko 38, Taulukko 39, Taulukko 40). Sidottujen seosten pH-arvojen keskiarvojen vaihteluväli on 12,04 ja 12,76 välillä. Voimakkaimmin emäksinen on Ecolan uusiosideaineella (8 p-%) sidottu koekappale keskiarvolla 12,76. Toiseksi emäksisin on pikasementillä (4 p-%) sidottu koekappale keskiarvolla 12,57. Kolmanneksi emäksisimmät ovat 12,04 keskiarvolla kivihiilenpolton lentotuhkalla aktivaattorin kanssa (10+2 p-%) ja biopolton lentotuhkalla aktivaattorin kanssa (8+2 p-%) sidotut koekappaleet.

Taulukko 37. WFS+KaM 0/20+CEM-2-1 koekappaleen pH-arvot.

| Seos Tunnus | Näyte # | Mittauslämpötila [°C] | pH-arvot [Lukuarvot] |
|---------------------|------------|--------------------------|-------------------------|
| WFS+KaM0-20+CEM-2-1 | CEM I-1 | 23,6 | 12,57 |
| | CEM I-2 | 23,6 | 12,57 |
| | CEM I-3 | 23,6 | 12,57 |
| | KA. | | 12,57 |

Taulukko 38. WFS+KaM 0/20+KPLT-2-1 koekappaleen pH-arvot.

| Seos Tunnus | Näyte # | Mittauslämpötila [°C] | pH-arvot [Lukuarvot] |
|-----------------------|------------|--------------------------|-------------------------|
| WFS+KaM0-20+KPLTA-2-1 | KPLT+A-1 | 23,6 | 12,00 |
| | KPLT+A-2 | 23,6 | 12,05 |
| | KPLT+A-3 | 23,6 | 12,06 |
| | KA. | | 12,04 |

Taulukko 39. WFS+KaM 0/20+ECO-2-1 koekappaleen pH-arvot.

| Seos Tunnus | Näyte # | Mittauslämpötila [°C] | pH-arvot [Lukuarvot] |
|---------------------|------------|--------------------------|-------------------------|
| WFS+KaM0-20+ECO-2-1 | ECOLAN-1 | 23,6 | 12,75 |
| | ECOLAN-2 | 23,6 | 12,77 |
| | ECOLAN-3 | 23,6 | 12,77 |
| | KA. | | 12,76 |

Taulukko 40. WFS+KaM 0/20+BPLTA-2-1 koekappaleen pH-arvot.

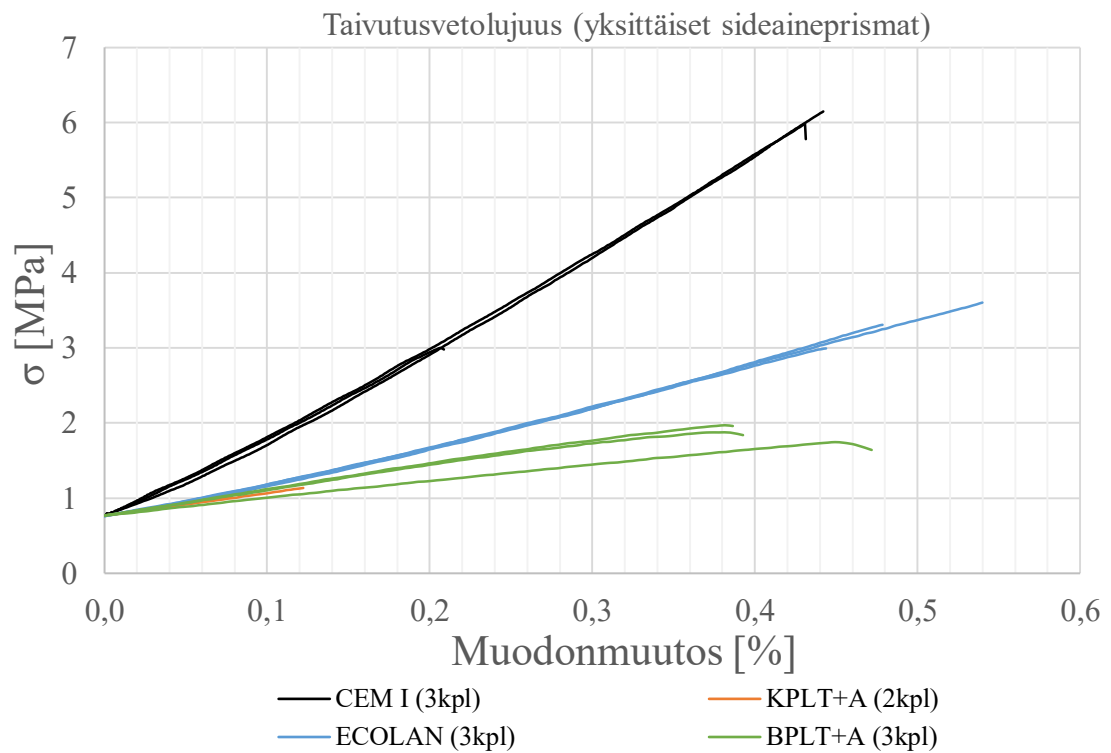
| Seos Tunnus | Näyte # | Mittauslämpötila [°C] | pH-arvot [Lukuarvot] |
|-----------------------|------------|--------------------------|-------------------------|
| WFS+KaM0-20+BPLTA-2-1 | BPLT+A-1 | 23,6 | 12,03 |
| | BPLT+A-2 | 23,6 | 12,04 |
| | BPLT+A-3 | 23,6 | 12,05 |
| | KA. | | 12,04 |

6.4 Sideaineiden taivutus- ja puristuskestävyys

Sideaineiden taivutus- ja puristuskestävyyden määrittämisellä tutkitaan sideaineen mekaanista kestävyttä taivutusta ja puristusta vastaan. Periaatteena on valmistaa sideaineen ja veden seoksesta koekappaleet, jotka kojeistetaan lujittumisen jälkeen 28 vuorokauden kuluessa valmistuksesta. Yksittäinen koekappale kojeistetaan ensin taivuttamalla, jonka jälkeen samainen koekappale kuormitetaan puristamalla. Taivutuslujuuden ja puristuslujuuden yksikkö on pascal [Pa], eli voima jaettuna pinta-alalle [$\frac{N}{mm^2}$]. Sideaineiden taivutus- ja puristuslujuus sovellettiin eurooppalaista standardia SFS-EN 196-1:2016. Standardi on kehitetty sementin ominaisuuksien määrittämiseen, jossa seos koostuu runkoaineesta, sementistä ja vedestä.

Tämän tutkimuksen seoksissa käytettiin sideaineita, aktivaattoria kivihiilenpoltonlentotuhkan sekä biopolton lentotuhkan seassa ja vettä. Seoksissa ei ole runkoainetta edellä mainittujen lisäksi. Veden suhde sideaineseoksessa on 1:2 (50 %). Seokset valmistettiin huoneen lämpötilassa sekoittaen mikserillä ensin hitaammalla vaihteella 90 sekunnin ajan ja lopuksi 60 sekunnin ajan nopeammalla vaihteella. Seokset valettiin teräsmuotteihin, joissa kullekin seokselle on kolme koekappaleita. Koekappaleiden dimensioina pituus 160 mm, korkeus 40 mm ja leveys 40 mm. Valamisen jälkeen koekappaleiden pinnat tasattiin muovisella viivaimella ja lopuksi muotin yläpintaan asetettiin muovikelmu estämään veden haihtumista koekappaleista. Koekappaleiden annettiin lujittua muoteissa 24 tuntia huoneen lämpötilassa 23 °C. Koekappaleiden seokset valittiin käyttäen pikasementin ja Ecolanin osalta 100% sideainetta, ja kivihiilen polton lentotuhkan sekä biopolton lentotuhkan osalta seoksessa 2% aktivaattoria kuitenkin niin, että aktivaattorin osuus tuhkan määrästä oli samassa suhteessa, kuin luvussa 6.1 taulukossa (Taulukko 31) valimohiekan WFS ja kalliomurskeen KaM 0/20 seoksessa käytetyissä sideaineissa.

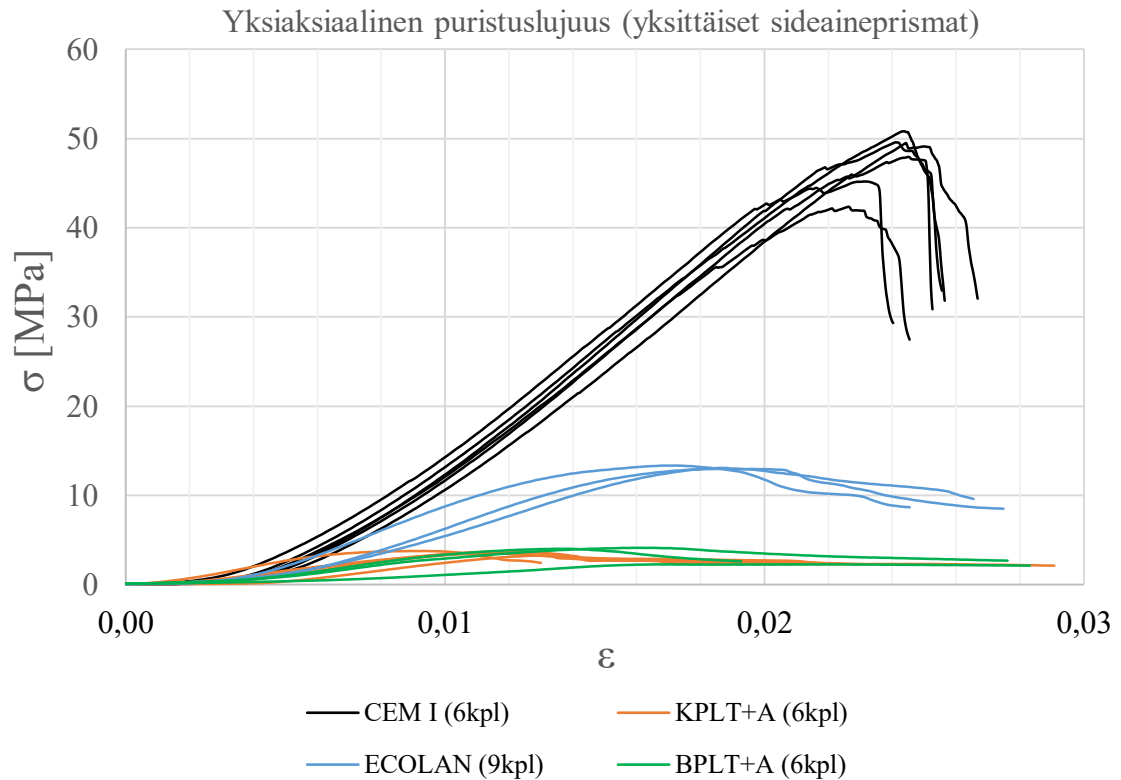
Taivutusvetolujuuksien kuvaajat eri sideaineille on esitettyinä kuvaajassa (Kuva 29) ja puristuslujuuden arvot sideaineille kuvaajassa (Kuva 30). Kuvaajien aloituspisteet on korjattu alkamaan 0,77 MPa pisteestä taivutusvetolujuudelle ja 0,05 MPa pisteestä puristuslujuudelle, jotta eri sideaineiden tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään. Taivutusvetolujuus ja puristuslujuus kuvaajien alla on taulukoituna sideaineprismojen koekappalemäärät, minimi ja maksimi arvot kokeessa sekä keskiarvo tuloksille (Taulukko 41, Taulukko 42).



Kuva 29. Yksittäisten sideaineprismojen taivutusvetolujuuden kuvaajat.

Taulukko 41. Sideaineprismojen taivutusvetolujuuksien arvoja.

| Sideaine (%) | Koekappale (lukumäärä) | Taivutusvetolujuus R_f [kPa] | | |
|--|---------------------------|--------------------------------|---------|-----------|
| | | Minimi | Maksimi | Keskiarvo |
| Pikaseementti CEM I (100%) | 3 | 2997 | 6146 | 5042 |
| Kivihiilen polton lentotuhka (83%) + Aktivaattori CEM I (17%) | 2 | 1008 | 1136 | 1072 |
| Ecolan uusiosideaine Stabi 80 (100%) | 3 | 2993 | 3603 | 3301 |
| Biopolton lentotuhka (80%) + Aktivaattori CEM I (20%) | 3 | 1746 | 1971 | 1864 |



Kuva 30. Yksittäisten sideaineprismojen puristuslujuuden kuvaajat.

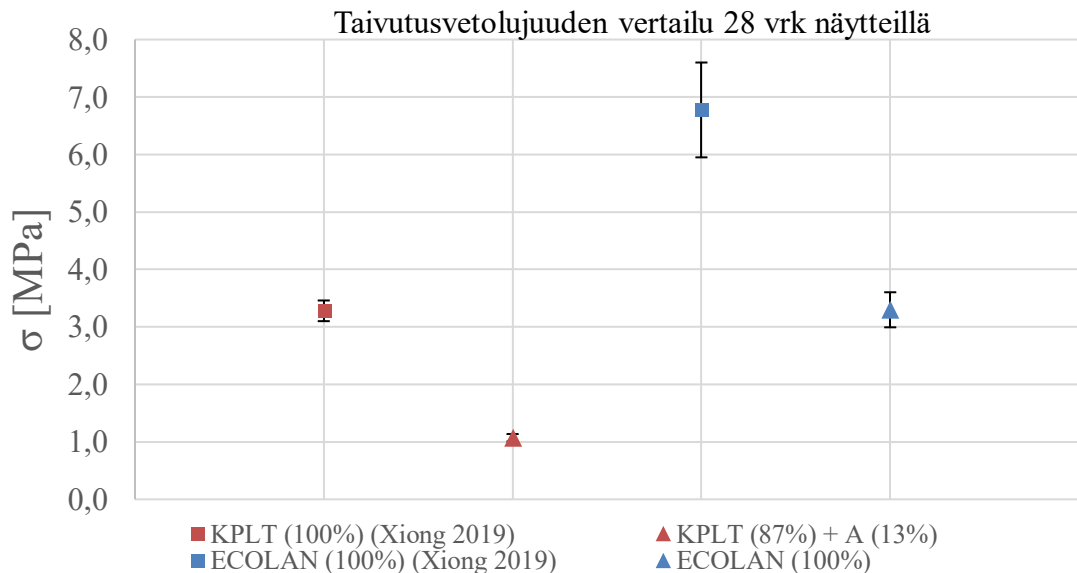
Taulukko 42. Sideaineprismojen puristuslujuuksien arvoja.

| Sideaine (%) | Koekappale (lukumäärä) | Puristuslujuus R_c [kPa] | | |
|--|---------------------------|----------------------------|---------|-----------|
| | | Minimi | Maksimi | Keskiarvo |
| Pikasementti CEM I (100%) | 6 | 42351 | 50818 | 47561 |
| Kivihiilen polton lentotuhka (83%) + Aktivaattori CEM I (17%) | 6 | 3261 | 3767 | 3519 |
| Ecolan uusiosideaine Stabi 80 (100%) | 9 | 10257 | 15466 | 12495 |
| Biopolton lentotuhka (80%) + Aktivaattori CEM I (20%) | 6 | 1790 | 4615 | 3500 |

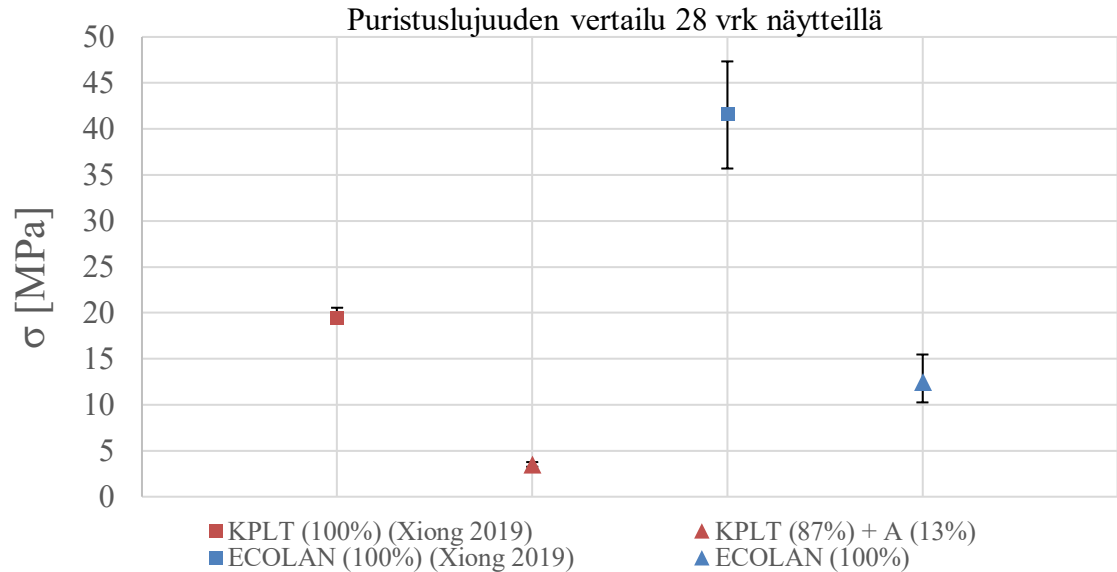
Taivutusvetolujuus- ja yksiakselialisen puristuslujuuskokeen tulokset ovat linjassa toistensa kanssa. Pikasementti on sideaineista kestävin taivutusveto- ja puristuslujuuskestävyydessä. Ecolan uusiosideaine on toiseksi kestävin ja kivihiilen polton ja biopolton lentotuhkat aktivaattorilla jään alhaisimmiksi tuloksiltaan, joista biopolton lentotuhkalla hieman korkeampi taivutusvetolujuuskestävyys verrattuna kivihiilen polton lentotuhkaan, minkä lieene selittävän astetta suurempi aktivaattoripitoisuus suhteessa biotuhkaan. Yksiakselialisen puristuslujuuskokeen aikana laitteistoissa ilmeni kontaktihäiriö biopolton lentotuhkan ja Ecolan uusiosideaineen kuormituksessa, joka aiheutti puristuslujuustiedon vääristymisen tallennuksessa. Kontaktihäiriön seurauksena biopolton lentotuhkan ja Ecolan koekappaleiden kokoa jouduttiin pienentämään ja toistamaan koe. Koekappaleina käytettiin taivutuskokeessa puolittuneiden yksittäisten sideaineprismojen keskikohdan reunoille jääneitä, pinta-alaltaan noin puolet pienempiä näytteitä, jotka olivat leikaantuneet ehjinä irti puolittuneesta prismasta yksiakselialisessa puristuslujuuskokeessa.

kontaktihäiriön aikana. Tämän seurauksena puristuslujuustulokset Ecolan uusiosideaineella ja biopolton lentotuhkalle aktivaattorilla ovat vaihteluväliltään suurempia muihin sideaineisiin nähden.

Taivutusvetolujuuden ja yksiaksiaalisen puristuslujuuden tuloksia kivihiilen polton lentotuhkalle aktivaattorilla ja Ecolan uusiosideaineelle on vertailtu alapuolella olevissa kuvaajissa Aalto-yliopistossa alkuvuodesta 2019 valmistuneessa diplomityössä (Xiong 2019, s.53) saatuihin arvoihin. Alapuolella olevissa kuvaajissa (Kuva 31) ja (Kuva 32) on huomattavissa merkittävä ero taivutusvetolujuudelle ja puristuslujuudelle määritetyissä arvoissa 28 vuorokauden ikäisille koekappaleille. Huomattavaa on, että kivihiilen polton lentotuhka on sama molemmissa tutkimuksissa, mutta tässä tutkimuksessa vuoden vanhempaa iältään. Tämä osaltaan selittää lujuuden heikentymää referenssitutkimukseen nähden. Lisäksi tässä tutkimuksessa on kivihiilen polton lentotuhkan seassa käytetty aktivaattoria. Referenssitutkimuksessa käytetty Ecolan uusiosideaine poikkeaa tässä tutkimuksessa käytetystä Ecolan uusiosideaineesta, ollen käytännössä eri tuote. Kuvaajissa neliön muotoiset symbolit ovat referenssi tutkimuksen tuloksia ja kolmio-symbolit tämän tutkimuksen tuloksia vaihteluväleineen.



Kuva 31. Kivihiilen polton lentotuhkan aktivaattorilla ja Ecolan uusiosideaine koekappaleiden taivutusvetolujuuden vertailua.



Kuva 32. Kivihiilen polton lentotuhkan aktivaattorilla ja Ecolan uusiosideaine koekappaleiden puristuslujuuden vertailua.

6.5 pH-arvo sideaineille

pH-arvo sideaineille määritettiin Aalto-yliopiston maalaboratorion omalla menetelmällä (Aalto-yliopisto 2017) käyttäen kalibroitua elektronista pH-arvon ilmaisinalaitetta. Menetelmässä käytetty seosnäyte valmistettiin yhdistämällä sideaine 20 ml ja 50 ml tislattua vettä seoslasissa, antaen tislattun veden imeytyä näytteeseen 24 h. Imeytyksen jälkeen seos sekoitettiin huolellisesti ja sekoittuneen seoksen pH-arvo mitattiin kalibroidulla ilmaisimella. Tutkimuksessa määritetyt pH-arvot sideaineille on esitettyä alapuolella olevassa taulukossa (Taulukko 43). Voimakkaimmin emäksinen sideaineista on tutkimuksen tulosten mukaan pikasementti ja emäksisyys järjestyksessä seuraavaksi tulevat biopolton lentotuhka, Ecolan uusiosideaine ja kivihiilen polton lentotuhka. pH-arvojen vaihteluväli sideaineiden välillä on 12,96...12,67. Sideaineille määritetyt pH-arvot ovat hieman korkeampia verrattuna sideaineilla sidottujen puristuslujuuskoekappaleiden näytteisiin (Taulukko 37, Taulukko 38, Taulukko 39, Taulukko 40) luvussa 6.3. Etenkin kivihiilen polton ja biopolton lentotuhkalla aktivaattorin avulla sidotut koekappaleet jäävät selkeimmin alhaisemmiksi sideaineiden pH-arvoihin nähden, molempien seosten ollen keskiarvoltaan 12,04. Lopulta voidaan kuitenkin todeta tutkimustulosten perusteella, että sidotut koekappaleet ja sideaineet ovat hyvin emäksisiä.

Taulukko 43. Tutkimuksessa käytetyille sideaineille määritettyjä pH-arvoja.

| Näyte (sideaine) | Mittauslämpötila [°C] | pH-arvot [Yksikötön] |
|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Pikasementti (CEM I) | 24 ± 2 | 12,96 |
| Kivihiilen polton lentotuhka (KPLT) | | 12,67 |
| Ecolan uusiosideaine (ECOLAN) | | 12,81 |
| Biopolton lentotuhka (BPLT) | | 12,91 |

7 Tulosten analyysi

Tässä luvussa käsitellään valimohiekan WFS soveltuvuuden varmentaminen tierakentteeseen suodatinkerrokseen sitomattomana ja analysoidaan sidotun valimohiekan WFS soveltuvuutta tierakenteessa kantavaan kerrokseen. Kaikki sitomattoman materiaalin tutkimuksen kokeet luvussa 5 tehtiin alphaset valimohiekalle WFS ja sidotulle valimohiekalle tehdyt kokeet luvussa 6 alphaset valimohiekalle WFS/WFSR. Tutkimuksessa käytetyssä valimohiekassa WFS oli alhainen hienoainespitoisuus. Tämän vuoksi valimohiekan WFS rakeisuus ja ominaisuuksien soveltuvuus tulee tutkia tapauskohtaisesti rakentamiskohteen etenkin tuorehiekan osalta.

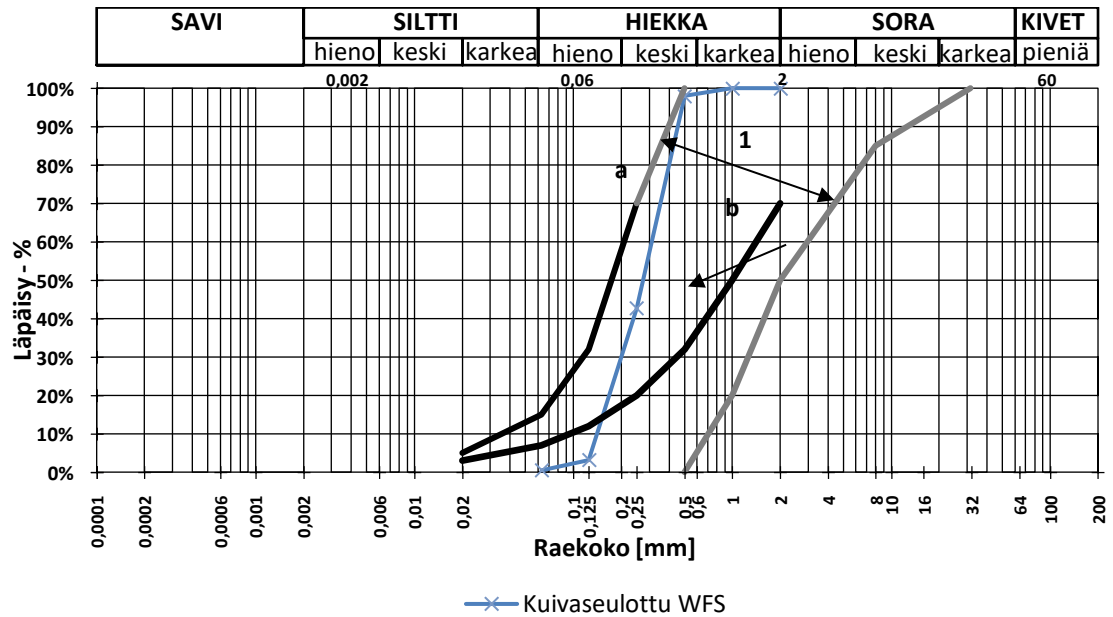
7.1 Valimohiekan WFS soveltuvuus suodatinkerrokseen

Nykyisellään valimohiekka WFS täyttää teknisesti tierakenteen suodatinkerrokselle asetetut laatuvaatimukset. Kuitenkin valimohiekasta WFS todetaan valmisteilla olevassa väyläviraston ohjeessa lisäksi, että valimohiekan WFS käytöstä on kertynyt vain vähän käyttökokemuksia, mutta tuotteistettuna se voi olla potentiaalinen rakennusmateriaali väylärakennushankkeessa. (Motiva Oy 2019, Taulukko 2.3, Väylävirasto 2019). Lisäksi todettakoon, että kaikki valimohiekat WFS eivät sovellu käyttötarkoitukseen. Esimerkiksi tuorehiekalla on alhainen vedenjohtavuus ja korkea hienoainespitoisuus verrattuna tässä tutkimuksessa tutkittuun alphaset valimohiekkaan WFS.

Tässä tutkimuksessa tutkittua valimohiekkaa WFS analysoidaan rakeisuuden, kapillaarisen vedenimeytymisen, vedenläpäisevyyden ja routivuuden perusteella ja varmennetaan tutkimustulosten kautta valimohiekan teknistä soveltuvuutta suodatinkerrokseen. Suodatinkerroksen tehtävä tierakenteessa on käytännössä estää veden nousu kapillaarisesti pohjamaasta, estää pohjamaan ja jakavan kerroksen sekoittuminen sekä olla vettä läpäisevä kerros, johtaen tierakenteeseen kertynyt vesi pois rakenteesta pohjamaahan. Tierakenne pyritään suunnittelemaan siten, että vedenläpäisevyys kasvaa mentäessä päällystekerroksesta alaspäin, jolloin päällyste olisi vettä läpäisemätön ja suodatinkerroksella olisi suurin vedenläpäisevyyttä rakenteessa.

Valimohiekan WFS rakeisuutta verrataan infrarakentamisen laatuvaatimuksessa esitettyyn tekniseen rakeisuusaluevaatimukseen suodatinkerrokselle, joka on esitettyinä kuvajassa alapuolella.

Rakeisuus valimohiekka WFS (InfraRYL 21110.K1)

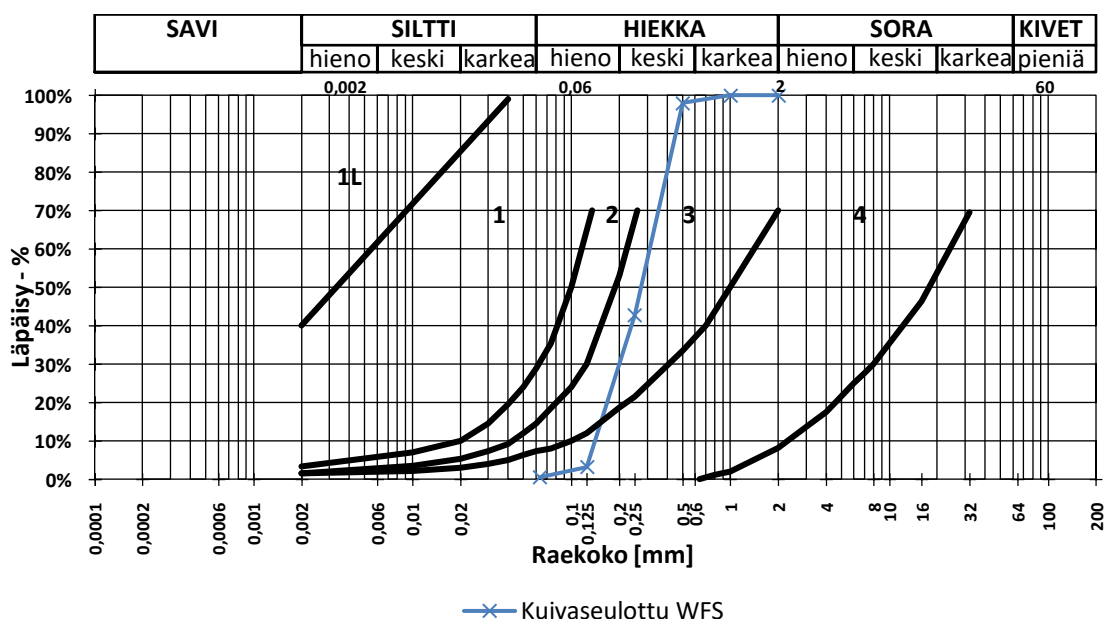


Kuva 33. Valimohiekka WFS rakeisuuskäyrä sijoitettuna suodatinkerrokselle asetetulle vaatimusalueelle.

Infrarakentamisen yleisissä laatuvaatimuksissa (InfraRYL) (Rakennustieto Oy 2019, kuva 21110:K1) esitettyssä teknisessä ehdossa rakeisuuskäyrä ei saa ylittää paksua viivaa (b) nuolen suunnassa ja tulee sijaita tummanharmaiden viivojen rajaaman alueen (1) sisäpuolella. Tutkittu valimohiekka WFS täyttää edellä mainitun rakeisuudelle asetetun vaatimuksen.

Valimohiekan WFS routivuusherkeyys tutkittiin luvussa 5.9 routanousukokeella. Koetulokseksi määritetty routivuuskerroin (SP) täyttää routimattomuus ehdon määritetyn arvon ollessa $0,17 < 0,5 \frac{\text{mm}^2}{\text{Kh}}$. Routanousukokeen tuloksen perusteella valimohiekka WFS on routimatonta. Lisäksi valimohiekan WFS routivuusherkeyys voidaan analysoida eurooppalaisen standardin SFS-EN ISO 13793:2001 sivulla 41 liitteessä esitetyn rakeisuuskäyräperusteisen routivuusluokituksen perusteella. Alla olevassa rakeisuuskuvaajassa on esitettyä valimohiekan WFS rakeisuuskäyrä sijoitettuna routivuusluokitusten mukaisille rakeisuusalueille.

Rakeisuus valimohiekka WFS (SFS-EN ISO 13793)



Kuva 34. Valimohiekka WFS rakeisuuskäyrä sijoitettuna eurooppalaisen standardin SFS-EN 13793:2001 liitteessä D esitettyyn routivuushuokituksen rakeisuuden mukaan.

Standardissa esitettyssä routivuushuokituksessa rakeisuudelle todetaan, että mikäli maa-aineksen 0,02 mm raekoko on alle 3 %, ja jos rakeisuuskäyrä sijaitsee alueilla 2, 3 tai 4, tällöin tutkittu maa-aineksen on routimatonta. Lisäksi rakeisuuskäyrä ei saa leikata alaosassa seuraavaa vasemmanpuoleista rakeisuusaluearajaa ja maa-aineksen tulee täyttää kapillaarisuusvaatimus (< 1 metriä). Valimohiekan WFS rakeisuuden perusteella eurooppalaisen standardin routivuushuokittelun mukaan valimohiekka WFS on routimatonta.

Lisäksi sitomattomalle valimohiekalle WFS tehtiin tutkimuksissa kapillaarisen vedenimeytymisen määrittäminen luvussa 5.4 ja routanousukoe luvussa 5.9. Routivuuden ehtona on kapillaarisen vedenimeytymisen perusteella, että kapillaarisen vedenimeytymisen korkeus on < 1 metriä. Valimohiekalle WFS määritetty kapillaarisen vedenimeytymisen korkeus on 0,2 metriä, joten ehto täyttyy ja voidaan todeta, että valimohiekka WFS on routimaton kapillaarisen vedenimeytymisen perusteella.

Valimohiekan WFS vedenläpäisevyys määritettiin luvussa 5.5. Tutkimuksessa määritettyä vedenläpäisevyyden vaihteluväliä verrattiin kirjallisuudessa annettuihin vedenläpäisevyysarvojen vaihteluväleihin tyypillisille maalajeille ja tulosten perusteella valimohiekka WFS vastaa karkeaa (cSa)/keskikarkeaa (mSa)/hienoa (fSa) hiekkaa ISO-luokituksen mukaisesti. InfraRYL (2006, s. 51) annetaan suodatinkerrokselle suora toimivuusvaatimus vedenläpäisevyydelle (> 4,00E-05) ja tutkimuksessa valimohiekalle WFS määritetty vedenläpäisevyys täyttää tämän ehdon, ollen 1,033E-04...8,932E-05.

pH-arvoltaan valimohiekka WFS (alphanet) vaihtelee tämän tutkimuksen ja aiempien tutkimusten perusteella näytteiden keskiarvojen perusteella välillä 9,17...10,2. Vertailuarvona valimohiekan WFS pH-arvoille todettakoon suodatinkerroksen teknisesti soveltuvan uusiomateriaalin betonimurskeen pH-arvo, joka suunnitteluohjeen mukaan on voimakkaasti emäksinen > 11. Valimohiekan WFS pH-arvo on alhaisempi näytteiden keskiarvolta, kuin betonimurskeelle ilmoitettu pH-arvo. (Rudus Oy 2017, s.9.)

7.2 Valimohiekan WFS soveltuvuus kantavaan kerrokseen sidottuna

Sidotun valimohiekan WFS soveltuvuutta tierakenteessa kantavaan kerrokseen ei ole tutkittu Suomessa aikaisemmin ja tästä syystä nykyisellään sen käyttö ei ole sallittua. Tierakenteessa liikennekuorman vaikutus on pinta-alalle suurimmillaan tierakenteen yläpinnassa, josta kuorma jakautuu alempiin kerroksiin. Tästä syystä kantavalle kerrokselle, joka sijaitsee päällystekerrosten alapuolella, on annettu vaatimuksia muun muassa puristuslujuudelle. Tässä luvussa analysoidaan sidotun valimohiekan WFS puristuslujuustuloksia ja verrataan päällysrakenteen stabilointiohjeessa (Tiehallinto 2007a) annettuihin raja-arvoja 7 ja 28 vuorokauden ikäisille koekappaleille siten, että sementillä sidottuja koekappaleita verrataan sementtistabiloituihin seoksiin ja muilla sideaineilla sidottuja koekappaleita masuunihiekalla ja aktivaattorilla sidottuihin seoksiin. Lisäksi analysoidaan koekappaleiden pH-arvoja.

Infrarakentamisen yleisissä laatuvaatimuksissa annetaan tiiviysvaatimukset sementtistabiloiduille (SST) ja muilla sideaineilla stabiloiduille seoksille (Taulukko 44). Tutkimuksessa valmistettiin yhteensä kolme erilaista runkoaineiden seossarjaa, joista ensimmäisessä käytettiin runkoaineena valimohiekkaa WFS (100%) ja sideaineina vaihtelevilla pitoisuuksilla pikasementtiä, kivihiilen polton lentotuhkaa aktivaattorilla, Ecolan uusiosideainetta, biopolton lentotuhkaa aktivaattorilla ja ilman aktivaattoria sekä kalkkisementtiä. Kalkkisementillä sidottu seos reagoi koekappaleessa valimohiekan WFS kanssa aiheuttaen halkeilua, joten kalkkisementillä sidottuja koekappaleita ei tutkittu.

Taulukko 44. Stabiloinnin lopputiivistyksen tiiviysvaatimusvaihtoehdot. (Rakennustieto Oy 2019, taulukko 213212:T1.)

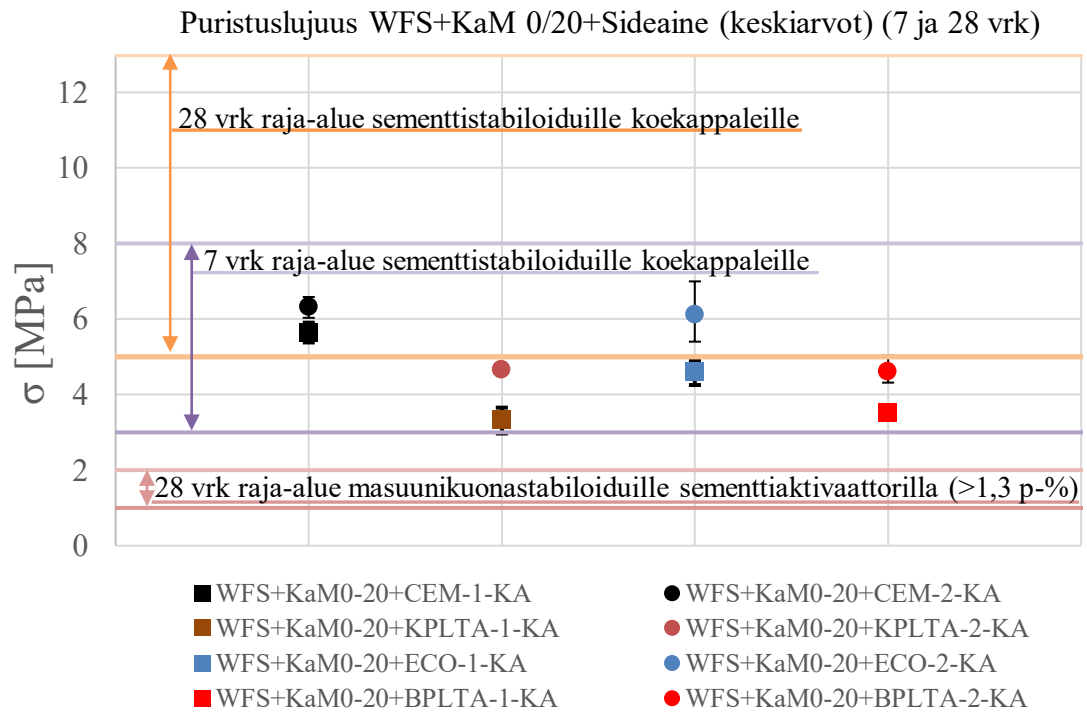
| Taulukko 213212:T1. Stabiloinnin lopputiivistyksen tiiviysvaatimusvaihtoehdot | | | |
|---|--------------------|-----------------------------------|--|
| Stabilointityyppi | Tiivysmittaustulos | % parannetusta Proctortiiviydestä | % ICT kiertotiivistetystä arvosta (200r) |
| Sementtistabilointi (SST) | keskiarvo | 96 | 97 |
| Muu kuin (SST) | keskiarvo | 95 | 96 |
| Kaikki | yksittäinen arvo | 92 | 94 |

Ensimmäisten seosten tiiviys perustui parannetulla proctor-kokeella määritettyihin arvoihin ja koekappaleet valmistettiin 96 % parannetusta proctor-tiiviydestä ja vesipitoisuutena seoksissa käytettiin optimivesipitoisuutta kussakin seoksessa. Seoksista pikasementillä sidottu seos oli (Taulukko 44) tiiviyden mukainen ja muut seokset 1 % suurempia tiiviydeltään. Käytännössä kaikilla sideaineilla sidotun valimohiekan WFS puristuslujuus 7 vuorokauden iässä jäi tutkimuksissa niin alhaiseksi (< 1 MPa), ettei sen jatkotutkimuksille nähty tarvetta. Tämän ensimmäisen seossarjan koekappaleiden heikkojen puristuslujuustulosten pohjalta päädyttiin valmistamaan toinen seossarja, jossa lisättyä kivituhkaa KaM 0/4 valimohiekan WFS sekaan.

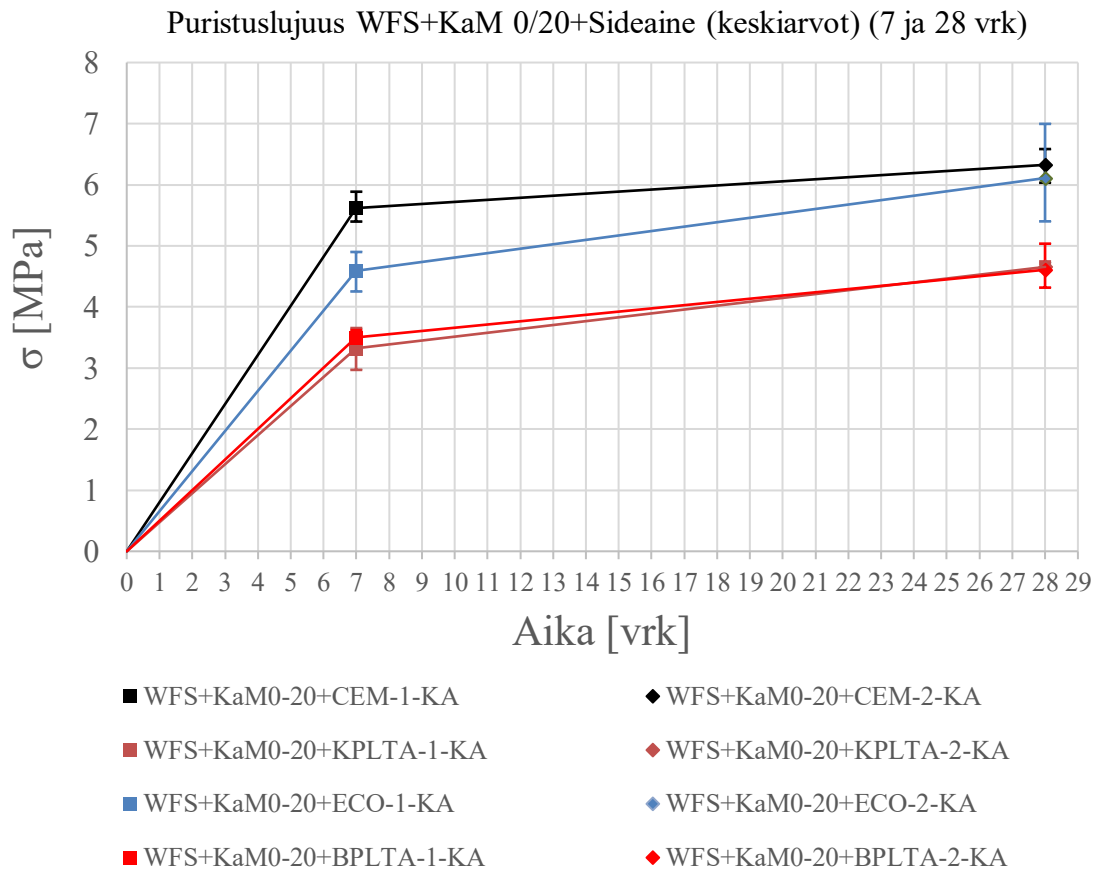
Toisessa seossarjassa valmistettiin seos, jossa käytettiin valimohiekkaa WFS ja kivituhkaa KaM 0/4 seossuhteilla 50/50 % ja 25/75 %. Sideaineena käytettiin pikasementtiä (4 p-%). Koekappaleiden tiiviyyttä ei määritetty seoksille erikseen, vaan maksimikuivairtiheyden ja optimivesipitoisuuden arvoina käytettiin materiaaleille erikseen parannetulla proctor-menetelmällä määritettyjä arvoja kivituhkan KaM 0/4 vähäisyydestä ja aikataulusta johtuen. Seoksen oletettu maksimi tiiviys laskettiin analyttisesti olettaen valimohiekan WFS ja kivituhkan KaM 0/4 arvovälien käyttäytyvän lineaarisesti runkoaineiden prosentuaalisten suhteiden mukaisesti kuivairtiheyden ja optimivesipitoisuuden osalta. Laskutapa avattuna koekappaleiden pöytäkirjassa, joka on liitteessä 5, sivuilla 1 ja 3. Koekappaleiden tiiviyyden vaihteluväli seosten kesken vaihteli 89...96 % analyttisesti oletetusta tiiviyydestä ja ne ovat (Taulukko 44) mukaiset. Seosten todellinen tiiviys voi kuitenkin olla muu, johtuen edellä mainitusta olettamuksesta.

Suurimman puristuslujuuden 2,12 MPa saavutti 6 vuorokauden ikäinen seos toisessa seossarjassa, jossa runkoaineena valimohiekan WFS osuus oli 25 % ja kivituhkan KaM 0/4 75 %. Koesarjan puristuslujuus tutkittiin 1 vrk etuajassa 96 % tiiviyteen valmistetuille koekappaleille johtuen aikatauluista. Puristuslujuustulokset sementtistabiloiduille koekappaleille jäivät kuitenkin alle minimivaatimuksen 6 ja 7 vuorokauden ikäisillä näytteillä sementtistabiloidulle seokselle (< 3 MPa). Jatkotutkimuksille ei nähty tarvetta valimohiekan WFS ja kivituhkan KaM 0/4 seokselle. Puristuslujuuskokeen tulosten pohjalta päädyttiin valmistamaan kolmas seossarja, jossa lisättynä kalliomursketta KaM 0/20 valimohiekan WFS sekaan.

Kolmannessa seossarjassa valmistettiin seos, jossa käytettiin valimohiekkaa WFS ja kalliomursketta KaM 0/20 seossuhteilla 25/75 %. Sideaineena käytettiin pikasementtiä (4 p-%), kivihiilenpolton lentotuhkaa aktivaattorilla ($8 + 2$ p-%), Ecolan uusiosideainetta (8 p-%) ja biopolton lentotuhkaa aktivaattorilla ($10 + 2$ p-%). Seossarjojen maksimikuivairtiheys ja optimivesipitoisuus määritettiin kiertotiivistimellä kiertomäärän vaihdelleessa 512...768 r kullekin seokselle. Maksimitiiviyyden määrittämisessä tavoiteltiin tilaa, jossa näyte saavutti lopulta muuttumattoman korkeuden. Kaikkien seosten koekappaleet valmistettiin 96 % tiiviyteen kiertotiivistyksellä saavutettuun maksimitiiviyteen. Vesipitoisuutena koekappaleissa käytettiin 6 %, joka oli noin 1 % korkeampi kuin määritetty optimivesipitoisuus seoksille. Kolmannen seossarjan koekappaleiden puristuslujuustulokset 7 ja 28 vuorokauden ikäisille näytteille saavuttivat niille asetetut minimiarvot ja tuloksien keskiarvot vaihteluväleillä on esitetty seuraavassa kuvaajassa (Kuva 35) sementtistabiloiduille ja masuunikuonastabiloiduille seoksille annettujen minimiarvojen kanssa.



Kuva 35. Valimohiekka WFS + kalliomurske KaM 0/20 + sideaine seosten puristuslujuuksien keskiarvot ja vaihteluvälit sekä tavoitearvot.



Kuva 36. Valimohiekan WFS + kalliomurskeen KaM 0/20 + sideaineseoksien puristuslujuuksien kehitys (28 vrk).

Kuvaajasta (Kuva 35) käy ilmi, että kaikki seokset täyttävät 7 vuorokauden puristuslujuusvaatimuksen, joka on esitetty taulukossa (Taulukko 32) sementtistabiloidulle materiaalille (3...5 MPa). Lisäksi kaikilla seoksilla 28 vuorokauden ikäisten koesarjojen puristuslujuudet ovat tavoitelujuuksia korkeammat. Ecolan uusiosideaineella sidotut 28 vuorokauden koekappaleet saavuttavat lähes yhtä korkean puristuslujuuden pikasementillä sidottujen koekappaleiden kanssa, molempien seosten ollen yli 6 MPa. Alhaisemman lujuuden saavuttavat kivihiilen polton lentotuhka aktivaattorilla sekä biopolton lentotuhka aktivaattorilla, pikasementillä ja Ecolan uusiosideaineella sidottuihin nähden, ollen kuitenkin 28 vuorokauden iässä noin kaksi kertaa korkeampia puristuslujuudeltaan taulukossa (Taulukko 32) annettuihin masuunikuonastabiloiduille seoksille aktivaattorilla annettuihin raja-arvoihin nähden. Kuvaajasta (Kuva 36) käy ilmi lujuudenkehitys eri sideaineilla sidotuille valimohiekan WFS ja kalliomurskeen KaM 0/20 seoksille ajan suhteen.

8 Johtopäätökset

Tämän diplomityön tutkimuksen tarkoitus on ollut tutkia valimoteollisuudessa käytetyn, teollisuusjätteen luokitellun valimohiekan WFS maarakennusteknisiä ominaisuuksia ja varmentaa sen soveltuvuus sitomattomana tierakenteen suodatinkerrokseen. Lisäksi tutkittiin valimohiekan WFS soveltuvuus eri sideaineilla sidottuna tierakenteen kantavaan kerrokseen käyttäen seassa lisäksi kivituhkaa KaM 0/4 ja kalliomursketta KaM 0/20 runkoaineena.

Nykyisellään valimohiekka WFS täyttää teknisesti suodatinkerrosmateriaalille asetetut kriteerit ja tässä tutkimuksessa tutkittujen ominaisuuksien perusteella voidaan todeta, ettei käytölle ole esteitä rakeisuuden, vedenläpäisevyyden, kapillaarisen nousukorkeuden ja routivuuden puolesta. Valimohiekan WFS ominaisuudet ovat lähellä tavanomaisen keskikarkean hiekan ominaisuuksia. Valimohiekka WFS kuuluu nykyisin MARA-asetuksen (Valtioneuvosto 2017) piiriin, joten sitä voidaan asetuksen mukaisesti käyttää ilmoitusmenettelyllä ilman erillistä ympäristölupaa hankkeissa.

Sidotun valimohiekan WFS soveltuvuutta tien kantavaan kerrokseen on tutkittu vähän kansainvälisesti. Suomen kansallisten, voimassa olevien vaatimusten mukaisesti valimohiekkaa WFS ei voi käyttää tierakenteen kantavassa kerroksessa (sellaisenaan tai stabiloituna) eikä jakavassa kerroksessa. Tässä tutkimuksessa tavoitteena oli tutkia sideaineella sidotun valimohiekan WFS soveltuvuutta tierakenteen kantavaan kerrokseen rakennusmateriaaliksi. Puristuslujuuden tutkimustulosten mukaan valimohiekka WFS sideaineella sidottuna ei täytä kantavuudelle asetettuja vaatimuksia. Myöskään seos, jossa valimohiekan WFS lisäksi käytettiin kivituhkaa KaM 0/4 ei täyttänyt puristuslujuudelle asetettua raja-arvoa. Valimohiekan WFS seassa käyttäen kalliomursketta KaM 0/20 seossuhteella 25/75% sidotuissa seoksissa, saavutettiin puristuslujuudelle asetetut raja-arvot kaikilla tutkimuksessa käytetyillä sideaineilla. Valimohiekan WFS käyttö sidottuna tierakenteessa ei kuulu MARA-asetuksen piiriin, vaan vaatii erillisen ympäristöluvan. Jotta valimohiekan WFS käyttö voisi olla laaja-alaisempaa ja sallittua väylärakenteissa suodatin-kerroksen lisäksi, niin tärkeää olisi kehittää ja tuottaa materiaali kattavien tutkimuksien pohjalta.

Jatkotutkimuksena sideaineilla sidottujen koekappaleiden korkeiden puristuslujuustulosten perusteella sidotuissa valimohiekan WFS ja kalliomurskeen KaM 0/20 seoksissa voitaisiin kasvattaa valimohiekan WFS osuutta runkoaineena tutkitun 25 % sijaan. Lisäksi kalliomurskeen KaM 0/20 korvaaminen jollakin toisella uusiomateriaalilla, kuten betonimurskeella ja sen puristuslujuuskestävyys olisi hyvä tutkia. Seosten koekappaleiden vedenläpäisevyys, kapillaarisuus, routimisherkkyyys ja jäädytys-sulatuskestävyys on tärkeä tutkia puristuslujuustutkimusten lisäksi, koska ne vaikuttavat rakenteen pitkäikäiseen säilymiseen käytännössä Suomen vaihtelevissa olosuhteissa.

Lähdeluettelo

Lait

Valtioneuvosto (2017). *Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maa-rakentamisessa*. Finlex. 843/2017. [Viitattu 23.9.2019]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170843>

Ympäristöministeriö (2013). *Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista*. Finlex. 331/2013. [Viitattu 23.9.2019]. Saatavissa: <http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130331>

Muut

Aalto-yliopisto (2017). *Maanäytteen pH-arvon määrittäminen (Ver. 1) työohje*. Aalto-yliopisto. Espoo, Suomi.

Aalto-yliopisto (2018). *Kiertotalous infrarakentamisessa (UKI II) -kurssin luentokalvot*. Aalto-yliopisto. Espoo, Suomi.

American Foundry Society (2019). *Bases and subbases*. American Foundry Society AFS. Verkkosivu. [Viitattu: 13.9.2019]. Saatavissa: <https://www.afsinc.org/bases-and-subbases/>

Autere, E., Ingman, Y. & Tennilä, P. (1986). *Valimotekniikka 2*. Insinööritieto Oy. Helsinki, Suomi. 636 s. ISBN 951-795-140-X.

Betoniteollisuus ry (2019). *Betoniteollisuus ry verkkosivut*. [Viitattu 9.8.2019]. Saatavissa: <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/betonin-valmistus/>

Doré, G. & Zubeck, H. (2009). *Cold regions pavement engineering*. American Society of Civil Engineers. Reston, Yhdysvallat. 401 s. ISBN: 978-0-07-160088-0.

Energiateollisuus ry (2012). *Tuhkarakentamisen käsikirja*. 1-65 s. [Viitattu 10.8.2019] Saatavissa: https://energia.fi/files/1137/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf

Finnsementti Oy (2019). *Pikasementti CEM I 52,5 R*. [Viitattu: 1.8.2019]. Saatavissa: https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Pikasementti_fi.pdf

Gedik, Abdulgazi & Lav, M. & Lav, A.. (2008). *Utilization of waste foundry sand as pavement sub-base and fill material*. Teoksessa: Ellis, E., Yu, H.-S., McDowell, G., Dawson, A. R., Thom, N. (toim.). *Advances in Transportation Geotechnics*. CRC Press. Lontoo, Britannia. 722 s. doi: <http://doi.org/10.1201/9780203885949>

Guney, Y., Aydilek, A. H. & Demirkan, M. M. (2006). *Geoenvironmental behavior of foundry sand amended mixtures for highway subbases*. *Waste Management*, 26(9). 932–945 s. doi: <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2005.06.007>

Helenelund, K. V. (1979). *Maarakennusmekaniikka 137 (6. painos)*. Otakustantamo. Ota-paino. Espoo, Suomi. 278 s. ISBN 951-671-060-3.

Javed, S. (1994). *Use of Waste Foundry Sand in Highway Construction : Final Report*. Publication FHWA/IN/JHRP-94/02J. Joint Highway Research Project, Indiana Department of Transportation and Purdue University. West Lafayette, Indiana. 273 s. doi: <https://doi.org/10.5703/1288284316152>

Kleven, J. R., Edil, T. B. & Benson, C. H. (2000). *Evaluation of Excess Foundry System Sands for Use as Subbase Material*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. (1714). 40–48 s. doi: <http://doi.org/10.3141/1714-06>

Korhonen, K.-H., Gardemeister, R. & Tammirinne, M. (1974). *Geotekninen maaluokitus*. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo, Suomi. 20+12 s. ISBN 951-38-0096-2. Saatavissa: https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/1970s/geotekniikan_tiedonanto_14.pdf

Liikennevirasto (2018). *Tierakenteen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 38/2018*. Liikennevirasto. Helsinki, Suomi. 127+7 s. ISBN 978-952-317-632-4. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-38_tierakenteen_suunnittelu_web.pdf

Maharjan, D. (2016). *Surplus foundry sand and its assessment of applicability in composting*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo, Suomi. 66+14 s. Saatavissa: https://aalto-doc.aalto.fi/bitstream/123456789/20506/1/master_Maharjan_Devendra_2016.pdf

Meehanite Technology Ltd (2018). *Re-use of surplus foundry sand by composting Progress Report LIFE-Foundrysand*. Meehanite Technology Ltd. Tampere, Suomi. 68 s. Saatavissa: http://life-foundrysand.com/dissemination-materials/final-report/at_download/file

Melander, M. (2018). *Kivituhkan soveltuminen sidotun kantavan kerroksen runkoaineeksi*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo, Suomi. 63+31 s. Saatavissa: https://aalto-doc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/32423/master_Melander_Marika_2018.pdf

Meskanen, S. & Höök, T. (2015a). *Hiekkavalimon valimoprosessi*. ValuAtlas - Valimotekniikan perusteet. [Viitattu: 20.8.2019]. 34 s. Saatavissa: <https://docplayer.fi/6131430-Hiekkavalimon-valimoprosessi.html>

Meskanen, S. & Höök, T. (2015b). *Kaavaushiekan valmistus ja uusiokäyttö*. ValuAtlas - Valimotekniikan perusteet. 28 s. [Viitattu: 20.8.2019]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/7599405-Kaavaushiekan-valmistus-ja-uusiokaytto.html>

Motiva Oy (2019). *UUMA-käsikirjasto, materiaalit ja niiden jalostaminen*. Motiva Oy. [Viitattu: 22.8.2019]. Saatavissa: <http://www.uusiomaarakentaminen.fi/materiaalit-ja-niiden-jalostaminen/>

Orkas, J. (1996). *Valimomateriaalien uusiokäyttö*. VAL 2/96. Teknillinen korkeakoulu, valimotekniikan laboratorio. Espoo, Suomi. 29+51 s. ISBN 951-22-2962-5.

Orkas J., Vehmas, M., Wahlström, M. & Laine-Ylijoki, J. (1999). *Valimoiden ylijäämähiekan hyötykäyttö- ja sijoituskelpoisuus*. TKK-VAL-1. Teknillinen korkeakoulu, Valimotekniikan laboratorio. Espoo, Suomi. 40+12 s. ISBN 951-22-4462-4.

Orkas J., Vehmas, M., Wahlström, M. & Laine-Ylijoki, J. (2001). *Valimoiden ylijäämähiekan hyötykäyttö- ja sijoituskelpoisuus, osa 2*. TKK-VAL-1. Teknillinen korkeakoulu, Valimotekniikan laboratorio. Espoo, Suomi. 48+14 s. ISBN 951-22-5522-7.

Orkas, J. (2001). *Technical and environmental requirements for surplus foundry sand utilization*. TKK-VAL-3. Teknillisen korkeakoulun valimotekniikan laboratorion julkaisuja. Espoo, Suomi. 139 s. ISBN 951-22-5640-1.

Orkas, J. (2019). *Valimohiekkojen sijainnit ja määrät*. Orkas, Juhani. Professori. Aalto-yliopisto. [Haastattelu]. (15.08.2019).

Päivinen, M. (2019). *Käytetyn valimohiekan soveltuvuus meluvallirakenteeseen*. Opin- näytetyö. Lahden ammattikorkeakoulu. Lahti, Suomi. 37+2 s. Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/160777/Mitja_Paivinen.pdf

Rakennustieto Oy (2006). *Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset (InfraRYL 2006), Osa 1 Väylät ja alueet*. Rakennustieto Oy. Helsinki, Suomi. 622 s. ISBN 978-951-682-801-8.

Rakennustieto Oy (2019). *Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset (InfraRYL), Infra- kortisto verkossa*. Rakennustieto Oy. Helsinki, Suomi. [Viitattu: 20.4.2019]. Saatavissa: <http://www.rakennustieto.fi/infraryl/>

Rakennustieto Oy. *RTS 17-56 Tuhkien käyttö maarakentamisessa - Tuhkaohjekortin kä- sikirjoitus (Lausunnolla)*. [Viitattu: 12.8.2019]. Saatavissa: http://www.rakennus- tieto.fi/material/attachments/5f1PeDhrH/NjY0Vs4V1/Tuhkaohjekortti_RTS_17-56.pdf

Repo, V. (2016). *Kuivakuorisaven routanousun tutkiminen halkaistavan routasellin avulla*. Aalto-yliopisto. Espoo, Suomi.

Rudus Oy (2017). *Betoroc -murskeohje*. 15 s. [Viitattu 19.9.2019]. Saatavissa: http://www.rudus.fi/Download/24032/Betoroc-murske_ohje.pdf

Räisänen, M., 2019. *Tiedonvaihtoa sähköpostitse ecolan uusiosideaineen teknisistä omi- naisuuksista*. Räisänen, Mikko. Ecolan Oy. [Haastattelu]. (25.6.2019).

Sappinen, T. (2016). *Valimoiden sivutuotteiden hyödyntäminen*. Kandidaatintyö. Aalto- yliopisto. Espoo, Suomi.

Sappinen, T. (2018) *Valimohiekkojen terminen elvytys osana teollista symbioosia*. Dip- lomityö. Aalto-yliopisto. Espoo. Saatavissa: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/30093/master_Sappinen_Tommi_2018.pdf

Sappinen, T. (2019). *Kommentti sähköisesti*. Sappinen, Tommi. Tohtorikoulutettava. Aalto-yliopisto. [Haastattelu] (28.9.2019).

Sappinen, T., Orkas, J., Kronqvist, T. (2018b). *Thermal reclamation of foundry sands using repurposed sand dryer equipment*. Archives of Foundry Engineering. Vol. 2018. No. 4. 99-102 s. doi: <http://doi.org/10.24425/afe.2018.125176>

Suomen Geoteknillinen Yhdistys ry (1985). *GLO-85 Geotekniset laboratorio-ohjeet*. Rakentajain Kustannus Oy. Espoo, Suomi. 107 s. ISBN 951-676-308-1.

Suomen Standardoimisliitto SFS ry (1996). *SFS-EN 933-2 Kiviainesten geometristen ominaisuuksien testaus. Osa 2: Rakeisuuden määrittäminen. Seulasarjat, aukkojen nimeliskoko*. Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Helsinki, Suomi. 1+3 s.

Suomen Standardoimisliitto SFS ry (1997). *SFS-EN 932-1 Kiviainesten yleisten ominaisuuksien testaus. Osa 1: Näytteenottomenetelmät*. Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Helsinki, Suomi. 1+11 s.

Suomen Standardoimisliitto SFS ry (2001). *SFS-EN ISO 13793 Thermal performance of buildings. Thermal design of foundations to avoid frost heave*. Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Helsinki, Suomi. 1+48 s.

Suomen Standardoimisliitto SFS ry (2003). *SFS-EN 13286-41 Unbound and hydraulically bound mixtures - Part 41: Test method for the determination of the compressive strength of hydraulically bound mixtures*. Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Helsinki, Suomi. 1+10 s.

Suomen Standardoimisliitto SFS ry (2004). *CEN ISO/TS 17892-11 Geotekninen tutkimus ja koestus. Maan laboratoriokokeet. Osa 11: Vedenläpäisevyyden määrittäminen. Vakiopaine- ja muuttuvapainekoe ja sen soveltaminen suomessa*. Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Helsinki, Suomi. 1+22 s.

Suomen Standardoimisliitto SFS ry (2011). *SFS-EN 13286-2 Unbound and hydraulically bound mixtures – Part 2: Test methods for laboratory reference density and water content. Proctor compaction*. Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Helsinki, Suomi. 1+29 s.

Suomen Standardoimisliitto SFS ry (2012). *SFS-EN 933-1 Kiviainesten geometristen ominaisuuksien testaus. Osa 1: Rakeisuuden määrittäminen. Seulontamenetelmä (2. Painos)*. Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Helsinki, Suomi. 1+16 s.

Suomen Standardoimisliitto SFS ry (2014). *SFS-EN 1097-6 Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 6 : Kiintotiheyden ja vedenimukyvyyn määrittäminen*. Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Helsinki, Suomi. 1+45 s.

Suomen Standardoimisliitto SFS ry (2018a). *SFS-EN ISO 14688-1:2018 Geotechnical investigation and testing. Identification and classification of soil. Part 1: Identification and description (ISO 14688-1:2017)*. Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Helsinki, Suomi. 29 s.

Suomen Standardoimisliitto SFS ry (2018b). *SFS-EN ISO 14688-2:2018 Geotechnical investigation and testing. Identification and classification of soil. Part 2: Principles for a classification (ISO 14688-2:2017) (2. painos)*. Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Helsinki, Suomi. 18 s.

Suomen Standardoimisliitto SFS ry (2019). *SFS-EN ISO 17892-10:2019 Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 10: Direct shear tests*. Suomen Standardoimisliitto SFS ry. Helsinki, Suomi. 26 s.

Tie- ja vesirakennushallitus (1970). *Maarakennusalan tutkimus- ja suunnitteluohjeita, Osa II*. Tvh 2.660. Tie- ja vesirakennushallitus. Valtion painatuskeskus. Helsinki, Suomi. 153 s.

Tiehallinto (2001). *ICT-koe tien rakennekerrosmateriaalien deformaatioherkkyyden määrittämisessä*. Tiehallinnon selvityksiä 63/2001. Tiehallinto. Helsinki, Suomi. 47+13 s. ISBN 951-726-815-7. Saatavissa: <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/139036/4240tie.pdf>

Tiehallinto (2002). *Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto*. Tiehallinto. Helsinki, Suomi. 72 s. ISBN 951-726-881-5. Saatavissa: <http://julkaisut.vayla.fi/pdf/3200747.pdf>

Tiehallinto (2007a). *Päällysrakenteen stabilointi. Suunnitteluvaiheen ohjaus*. Tiehallinto. Helsinki, Suomi. 53+16 s. ISBN 978-951-803-971-9. Saatavissa: http://julkaisut.vayla.fi/thohje/pdf/2100055-v-07paalysrakenteen_stabilointi.pdf

Tiehallinto (2007b). *Sivutuotteiden käyttö tierakenteissa. Suunnitteluvaiheen ohjaus*. Tiehallinto. Helsinki, Suomi. 68+7 s. ISBN 978-951-803-633-6. Saatavissa: <http://julkaisut.vayla.fi/thohje/pdf/2100041-v-07-sivutuoteohje.pdf>

U.S. Department of Transportation (2004). *Foundry Sand Facts for Civil Engineers - Report No. FHWA-IF-04-004*. Federal Highway Administration, (May). Washington, Yhdysvallat. 69 s. Saatavissa: <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/pubs/013791.pdf>

Väylävirasto (2019). *Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa (Luonnos 18.3.2019)*. Väylävirasto. Helsinki, Suomi. 32+18 s. Saatavissa: http://vayla.fi/documents/20485/175370/Uusiomateriaaliohje_lausuntoversio/141ba143-9f0f-4366-8c3f-47a197097435.

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka (2001). *TPPT 6 Menetelmäkuvaus Routimiskertoimen (SP) määrittämisestä*. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Espoo, Suomi. 11+3 s.

Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT (1989). *VTT Symposium 94 - Frost in geotechnical engineering, Volume 1*. Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT. VTT Offsetpaino. Espoo, Suomi. ISBN 951-38-3313-5.

Xiong, T. (2019). *The use of recycled materials as binders to stabilize soft clay in laboratory*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo, Suomi. Saatavissa: https://aalto-doc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/37154/master_Xiong_Tianlingzi_2019.pdf

Zhang, Y., Korkiala-Tanttu, L. K., Gustavsson & H., Miksic, A. (2019a). *Assessment for Sustainable Use of Quarry Fines as Pavement Construction Materials: Part I-Description of Basic Quarry Fine Properties*. Materials. 12(8). 17 s. doi: <http://doi.org/10.3390/ma12081209>

Zhang, Y., Korkiala-Tanttu, L. K. & Borén, M. (2019b). *Assessment for Sustainable Use of Quarry Fines as Pavement Construction Materials: Part II-Stabilization and Characterization of Quarry Fine Materials*. Materials. 12(15). 18 s. doi: <http://doi.org/10.3390/ma12152450>

Liiteluettelo

Liite 1. Valimohiekan WFS rakeisuusmäärityksen tulokset. 3 sivua.

Liite 2. Rasialeikkauskokeiden tulokset valimohiekalle WFS tavoitevesipitoisuudella $w=0\%$. 3 sivua.

Liite 3. Rasialeikkauskokeiden tulokset valimohiekalle WFS tavoitevesipitoisuudella $w=14\%$. 3 sivua.

Liite 4. Valimohiekka WFS + sideaineseosten ja puristuslujuuskoekappaleiden pöytäkirjat. 12 sivua.

Liite 5. Valimohiekka WFS + kivituhka KaM 0/4 + pikasementtiseosten ja puristuslujuuskoekappaleiden pöytäkirjat. 4 sivua.

Liite 6. Valimohiekka WFS + kalliomurske KaM 0/20 + sideaineseosten ja puristuslujuuskoekappaleiden pöytäkirjat. 8 sivua.

Liite 1. Valimohiekan WFS rakeisuusmäärityksen tulokset



Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden
korkeakoulu

Pohjarakennus ja maamekaniikka

Sivu 1 ()

Käsittelijä MV

pvm 22/05/2018

SEULONTA

Työ N:o

4-3-2018

Näytteenottoaika: Nuutajärven valimohiekan käsittelyasema FinnRecycling Oy

Piste, paalu: 1

Tutkimus: Valimohiekka ALPHASET $\phi=0.3\text{mm}$

Käsittelijä: M. Vilenius

Putki N:o

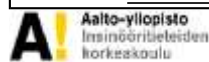
Syvyys:

SEULONTA

| Astia, g | Astia + kuiva näyte, g | | Kuiva näyte, g | | |
|------------|------------------------|----------|----------------|---------|----------|
| 0 | 200,9 | | 200,9 | | |
| Seula | Seulalle jäi | | Kumulatiivinen | Läpäisy | |
| mm | g | % | % | g | % |
| 64 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 200,9 | 100,00 % |
| 32 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 200,9 | 100,00 % |
| 16 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 200,9 | 100,00 % |
| 8 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 200,9 | 100,00 % |
| 4 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 200,9 | 100,00 % |
| 2 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 200,9 | 100,00 % |
| 1 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 200,9 | 100,00 % |
| 0,5 | 4,4 | 2,19 % | 2,19 % | 196,5 | 97,81 % |
| 0,25 | 116 | 57,74 % | 59,93 % | 80,5 | 40,07 % |
| 0,125 | 77,4 | 38,53 % | 98,46 % | 3,1 | 1,54 % |
| 0,063 | 3 | 1,49 % | 99,95 % | 0,1 | 0,05 % |
| Pohja+pesu | 0,1 | 0,05 % | 100,00 % | 0 | 0,00 % |
| Summa: | 200,9 | 100,00 % | | | |

| D85 | D60 | D50 | D10 | Cu |
|--------|--------|--------|--------|----|
| 0,4 mm | 0,3 mm | 0,3 mm | 0,2 mm | |

HUOM



Aalto-yliopisto
Insinööritieteiden
korkeakoulu

Pohjarakennus ja maamekaniikka

Sivu 2 ()

Käsittelijä MV

pvm 22/05/2018

SEULONTA

Työ N:o

04/03/2018

Näytteenottoaika: Nuutajärven valimohiekan käsittelyasema FinnRecycling Oy

Piste, paalu: 2

Tutkimus: Valimohiekka ALPHASET $\phi=0.3\text{mm}$

Käsittelijä: M. Vilenius

Putki N:o

Syvyys:

SEULONTA

| Astia, g | Astia + kuiva näyte, g | | Kuiva näyte, g | | |
|------------|------------------------|----------|----------------|---------|----------|
| 0 | 149,8 | | 149,8 | | |
| Seula | Seulalle jäi | | Kumulatiivinen | Läpäisy | |
| mm | g | % | % | g | % |
| 64 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 149,8 | 100,00 % |
| 32 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 149,8 | 100,00 % |
| 16 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 149,8 | 100,00 % |
| 8 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 149,8 | 100,00 % |
| 4 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 149,8 | 100,00 % |
| 2 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 149,8 | 100,00 % |
| 1 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 149,8 | 100,00 % |
| 0,5 | 2,8 | 1,87 % | 1,87 % | 147 | 98,13 % |
| 0,25 | 82 | 54,74 % | 56,61 % | 65 | 43,39 % |
| 0,125 | 61 | 40,72 % | 97,33 % | 4 | 2,67 % |
| 0,063 | 3,7 | 2,47 % | 99,80 % | 0,3 | 0,20 % |
| Pohja+pesu | 0,3 | 0,20 % | 100,00 % | 0 | 0,00 % |
| Summa: | 149,8 | 100,00 % | | | |

| D85 | D60 | D50 | D10 | Cu |
|--------|--------|--------|--------|----|
| 0,4 mm | 0,3 mm | 0,3 mm | 0,1 mm | |

HUOM

Näytteenottoaikka: Nuutajärven valimohiekan käsittelyasema FinnRecycling Oy Piste, paalu: 3

Tutkimus: Valimohiekka ALPHASET $\phi=0.3\text{mm}$

Käsittelijä: M. Vilenius

Putki N:o

Syvyys:

SEULONTA

| Astia, g | | Astia + kuiva näyte, g | | Kuiva näyte, g | |
|------------|--------------|------------------------|----------------|----------------|----------|
| 0 | | 150 | | 150 | |
| Seula | Seulalle jäi | | Kumulatiivinen | Läpäisy | |
| mm | g | % | | g | % |
| 64 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 32 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 16 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 8 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 4 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 2 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 1 | 0,1 | 0,07 % | 0,07 % | 149,9 | 99,93 % |
| 0,5 | 3,1 | 2,07 % | 2,13 % | 146,8 | 97,87 % |
| 0,25 | 87,9 | 58,60 % | 60,73 % | 58,9 | 39,27 % |
| 0,125 | 54,6 | 36,40 % | 97,13 % | 4,3 | 2,87 % |
| 0,063 | 3,8 | 2,53 % | 99,67 % | 0,5 | 0,33 % |
| Pohja+pesu | 0,5 | 0,33 % | 100,00 % | 0 | 0,00 % |
| Summa: | 150 | 100,00 % | | | |

| D85 | D60 | D50 | D10 | Cu |
|--------|--------|--------|--------|----|
| 0,4 mm | 0,3 mm | 0,3 mm | 0,1 mm | |

HUOM

Näytteenottoaikka: Nuutajärven valimohiekan käsittelyasema FinnRecycling Oy Piste, paalu: 4

Tutkimus: Valimohiekka ALPHASET $\phi=0.3\text{mm}$

Käsittelijä: M. Vilenius

Putki N:o

Syvyys:

SEULONTA

| Astia, g | | Astia + kuiva näyte, g | | Kuiva näyte, g | |
|------------|--------------|------------------------|----------------|----------------|----------|
| | | 150 | | 150 | |
| Seula | Seulalle jäi | | Kumulatiivinen | Läpäisy | |
| mm | g | % | | g | % |
| 64 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 32 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 16 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 8 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 4 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 2 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 1 | 0,1 | 0,07 % | 0,07 % | 149,9 | 99,93 % |
| 0,5 | 2,7 | 1,80 % | 1,87 % | 147,2 | 98,13 % |
| 0,25 | 80 | 53,33 % | 55,20 % | 67,2 | 44,80 % |
| 0,125 | 61,3 | 40,87 % | 96,07 % | 5,9 | 3,93 % |
| 0,063 | 4,8 | 3,20 % | 99,27 % | 1,1 | 0,73 % |
| Pohja+pesu | 1,1 | 0,73 % | 100,00 % | 0 | 0,00 % |
| Summa: | 150 | 100,00 % | | | |

| D85 | D60 | D50 | D10 | Cu |
|--------|--------|--------|--------|----|
| 0,4 mm | 0,3 mm | 0,3 mm | 0,1 mm | |

HUOM

Näytteenottopaikka: Nuutajärven valimohiekan käsittelyasema FinnRecycling Oy

Piste, paalu: 5

Tutkimus: Valimohiekka ALPHASET $\phi=0.3\text{mm}$

Käsittelijä: M. Vilenius

Putki N:o

Syvyys:

SEULONTA

| Astia, g | | Astia + kuiva näyte, g | | Kuiva näyte, g | |
|-------------|--------------|------------------------|---------------------|----------------|----------|
| | | 150 | | 150 | |
| Seula mm | Seulalle jäi | | Kumulatiivinen % | Läpäisy | |
| | g | % | | g | % |
| 64 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 32 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 16 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 8 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 4 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 2 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 1 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 0,5 | 2,6 | 1,73 % | 1,73 % | 147,4 | 98,27 % |
| 0,25 | 79,4 | 52,93 % | 54,67 % | 68 | 45,33 % |
| 0,125 | 62,2 | 41,47 % | 96,13 % | 5,8 | 3,87 % |
| 0,063 | 4,8 | 3,20 % | 99,33 % | 1 | 0,67 % |
| Pohja+pesu | 1 | 0,67 % | 100,00 % | 0 | 0,00 % |
| Summa: | 150 | 100,00 % | | | |

| D85 | D60 | D50 | D10 | Cu |
|--------|--------|--------|--------|----|
| 0,4 mm | 0,3 mm | 0,3 mm | 0,1 mm | |

HUOM

Näytteenottopaikka: Nuutajärven valimohiekan käsittelyasema FinnRecycling Oy

Piste, paalu: 6

Tutkimus: Valimohiekka ALPHASET $\phi=0.3\text{mm}$

Käsittelijä: M. Vilenius

Putki N:o

Syvyys:

SEULONTA

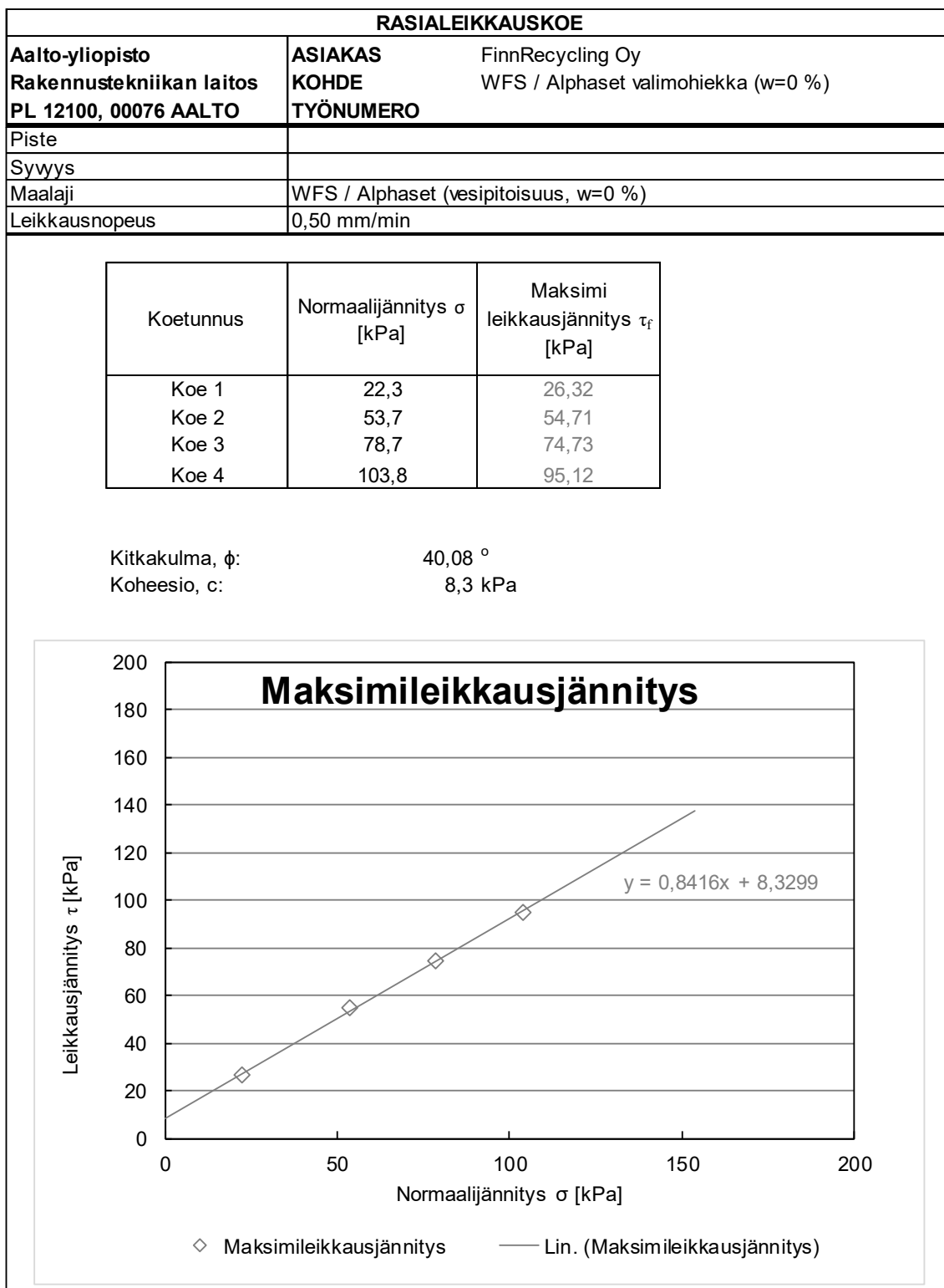
| Astia, g | | Astia + kuiva näyte, g | | Kuiva näyte, g | |
|-------------|--------------|------------------------|---------------------|----------------|----------|
| | | 50 | | 50 | |
| Seula mm | Seulalle jäi | | Kumulatiivinen % | Läpäisy | |
| | g | % | | g | % |
| 64 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 32 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 16 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 8 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 4 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 2 | 0 | 0,00 % | 0,00 % | 150 | 100,00 % |
| 1 | 0,2 | 0,13 % | 0,13 % | 149,8 | 99,87 % |
| 0,5 | 3,3 | 2,20 % | 2,33 % | 146,5 | 97,67 % |
| 0,25 | 81,7 | 54,47 % | 56,80 % | 64,8 | 43,20 % |
| 0,125 | 58,7 | 39,13 % | 95,93 % | 6,1 | 4,07 % |
| 0,063 | 4,9 | 3,27 % | 99,20 % | 1,2 | 0,80 % |
| Pohja+pesu | 1,2 | 0,80 % | 100,00 % | 0 | 0,00 % |
| Summa: | 150 | 100,00 % | | | |

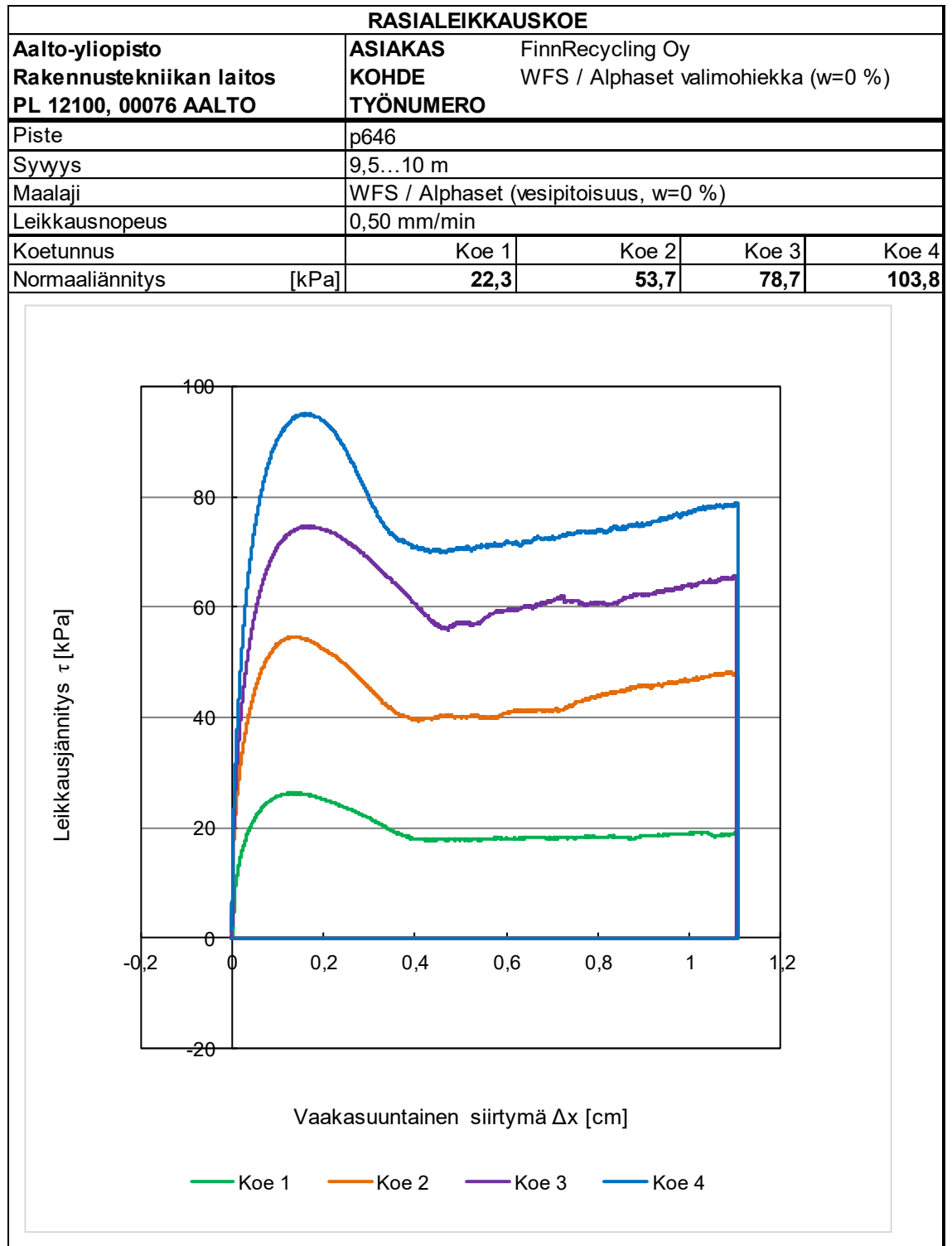
| D85 | D60 | D50 | D10 | Cu |
|--------|--------|--------|--------|----|
| 0,4 mm | 0,3 mm | 0,3 mm | 0,1 mm | |

HUOM

Liite 2. Rasialeikkauskokeen tulokset valimohiekalle WFS tavoitevesipitoisuudella w=0%

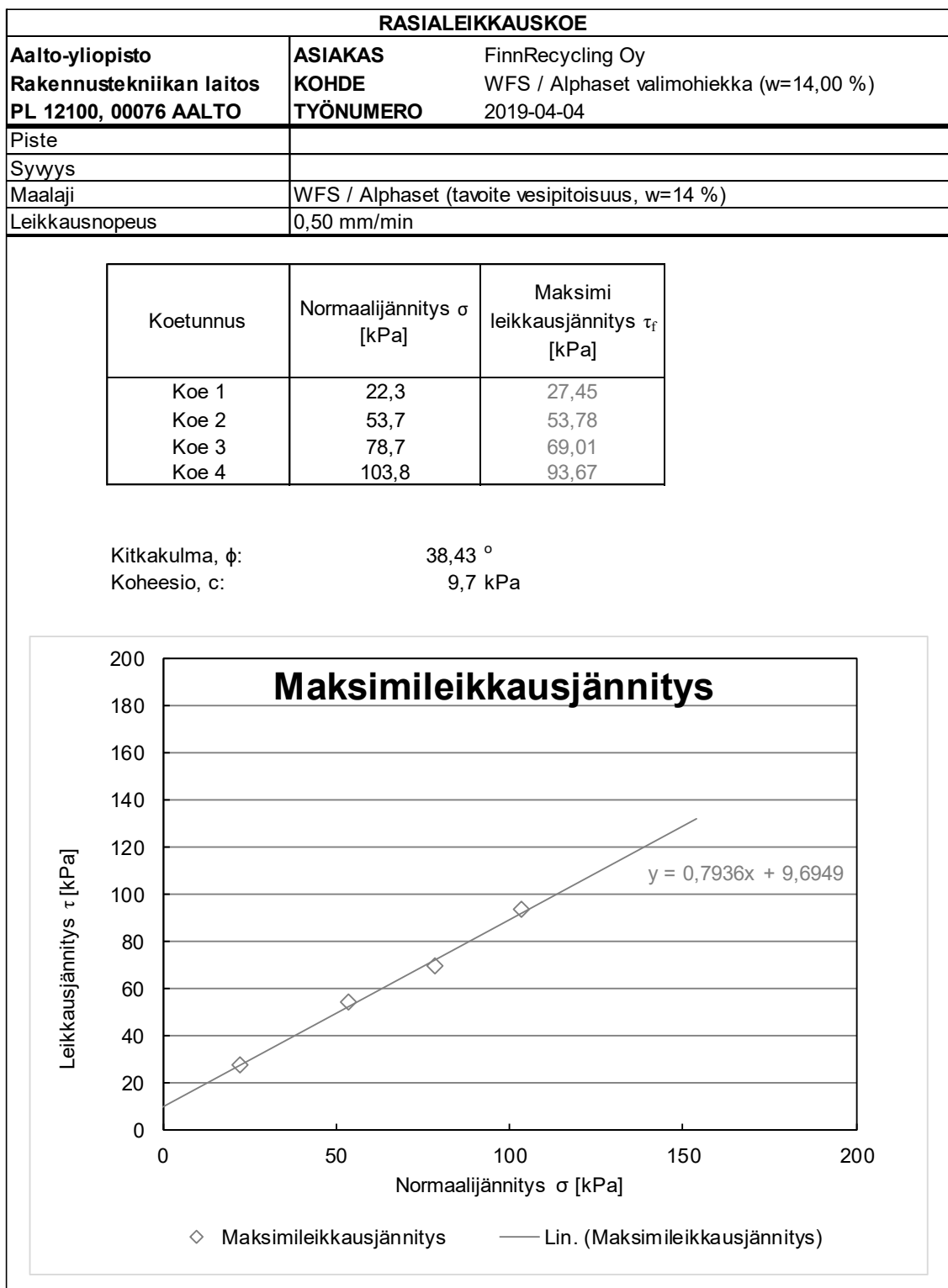
| RASIALEIKKAUSKOE | | | | |
|--|--|------------|------------|------------|
| Aalto-yliopisto Rakennustekniikan laitos PL 12100, 00076 AALTO | ASIAKAS FinnRecycling Oy KOHDE WFS / Alphaset valimohiekka (w=0 %) TYÖNUMERO | | | |
| Piste | p646 | | | |
| Syvyys | 9,5...10 m | | | |
| Maalaji | WFS / Alphaset (vesipitoisuus, w=0 %) | | | |
| Leikkausnopeus | 0,50 mm/min | | | |
| Koetunnus | Koe 1 | Koe 2 | Koe 3 | Koe 4 |
| Normaaliännitys [kPa] | 22,3 | 53,7 | 78,7 | 103,8 |
| Päivämäärä | 15/03/2019 | 14/03/2018 | 14/03/2019 | 14/03/2019 |
| Kokeen alussa | | | | |
| Näytteen korkeus [cm] | 3,90 | 3,90 | 3,90 | 4,00 |
| Näytteen poikkipinta-ala A [cm ²] | 35,65 | 35,65 | 35,65 | 35,65 |
| Näytteen leveys (=√A) [cm] | 5,97 | 5,97 | 5,97 | 5,97 |
| Näytteen tilavuus [cm ³] | 139,0 | 139,0 | 139,0 | 142,6 |
| Näytteen paino [g] | 234,9 | 234,6 | 231,4 | 239,1 |
| Kuivan näytteen paino [g] | 234,2 | 234,4 | 231,0 | 236,6 |
| Vesipitoisuus, arvio [%] | | | | |
| Irtotiheys [g/cm ³] | 1,690 | 1,687 | 1,664 | 1,677 |
| Kuiva irtotiheys [g/cm ³] | 1,685 | 1,686 | 1,661 | 1,659 |
| Kiintotiheys, oletus [g/cm ³] | 2,66 | 2,66 | 2,66 | 2,66 |
| Kyllästysaste Sr, arvio [%] | | | | |
| Huokosluku e ₀ , arvio | 0,577 | 0,575 | 0,599 | 0,601 |
| Konsolidoituneena | | | | |
| Kokoonpuristuma [mm] | 0,300 | 0,300 | 0,140 | 0,250 |
| Näytteen korkeus [cm] | 3,87 | 3,87 | 3,89 | 3,98 |
| Huokosluku e, arvio | 0,565 | 0,563 | 0,593 | 0,591 |
| Kokeen lopussa | | | | |
| Kostea näyte [g] | 234,8 | 234,8 | 231,6 | 237,3 |
| Kuiva näyte [g] | 234,2 | 234,4 | 231,0 | 236,6 |
| Vesipitoisuus [%] | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,3 |
| Huom | | | | |
| Tiivistetty kevyesti | | | | |

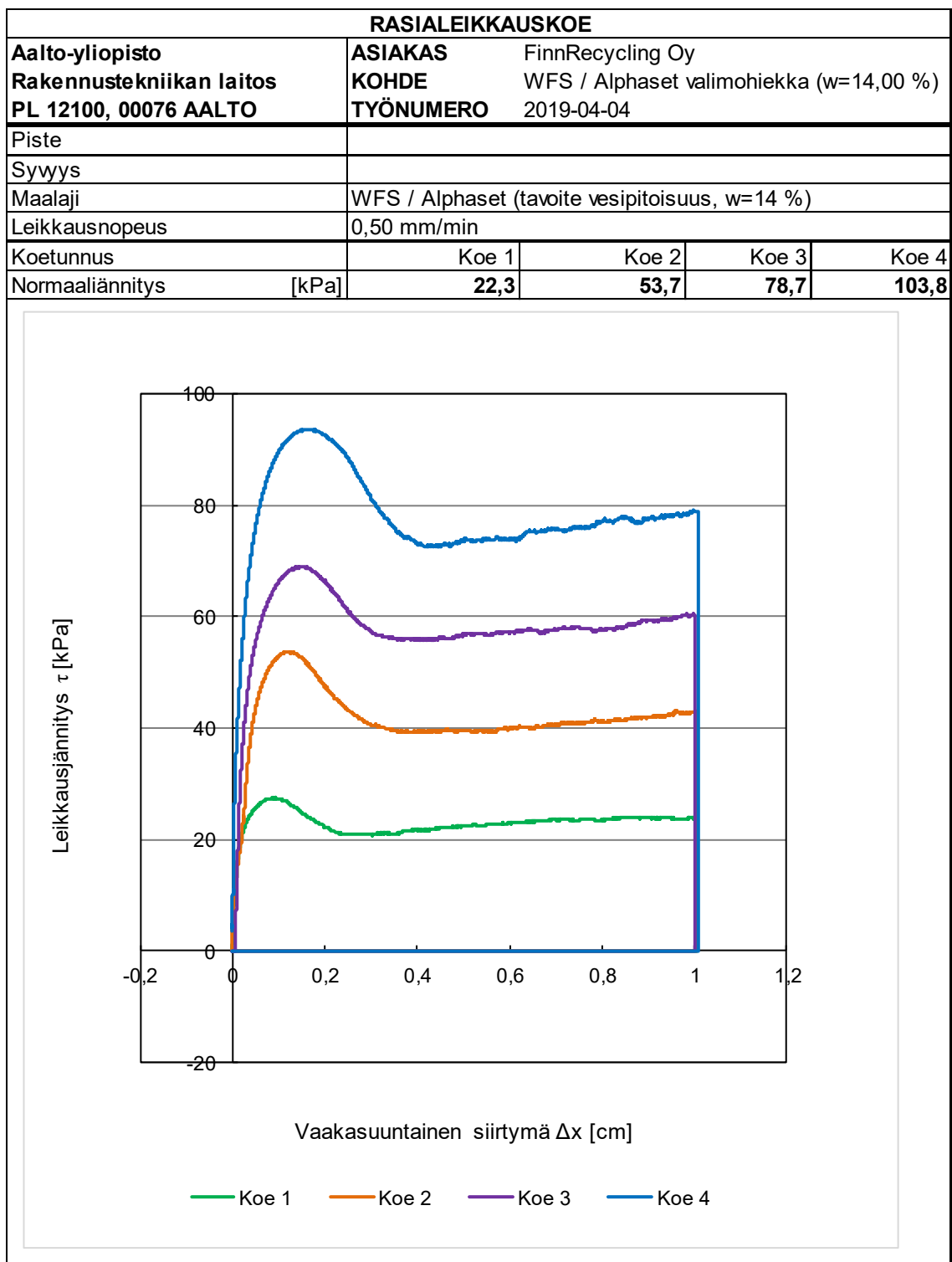




Liite 3. Rasialeikkauskoeen tulokset valimohiekalle WFS tavoitevesipitoisuudella w=14%

| RASIALEIKKAUSKOE | | | | |
|---|---|------------|------------|------------|
| Aalto-yliopisto | ASIAKAS FinnRecycling Oy | | | |
| Rakennustekniikan laitos | KOHDE WFS / Alphasets valimohiekka (w=14,00 %) | | | |
| PL 12100, 00076 AALTO | TYÖNUMERO 2019-04-04 | | | |
| Piste | | | | |
| Syvyys | | | | |
| Maalaji | WFS / Alphasets (tavoite vesipitoisuus, w=14 %) | | | |
| Leikkausnopeus | 0,50 mm/min | | | |
| Koetunnus | Koe 1 | Koe 2 | Koe 3 | Koe 4 |
| Normaaliännitys [kPa] | 22,3 | 53,7 | 78,7 | 103,8 |
| Päivämäärä | 08/04/2019 | 08/04/2019 | 08/04/2019 | 08/04/2019 |
| Kokeen alussa | | | | |
| Näytteen korkeus [cm] | 4,01 | 4,00 | 4,04 | 4,04 |
| Näytteen poikkipinta-ala A [cm ²] | 35,65 | 35,65 | 35,65 | 35,65 |
| Näytteen leveys (=√A) [cm] | 5,97 | 5,97 | 5,97 | 5,97 |
| Näytteen tilavuus [cm ³] | 143,1 | 142,8 | 143,9 | 144,1 |
| Näytteen paino [g] | 259,3 | 259,1 | 263,7 | 262,1 |
| Kuivan näytteen paino [g] | 226,3 | 227,7 | 230,1 | 228,5 |
| Vesipitoisuus, arvio [%] | 14,0 | 14,0 | 14,0 | 14,0 |
| Irtotiheys [g/cm ³] | 1,812 | 1,815 | 1,832 | 1,819 |
| Kuiva irtotiheys [g/cm ³] | 1,581 | 1,595 | 1,599 | 1,586 |
| Kiintotiheys, oletus [g/cm ³] | 2,66 | 2,66 | 2,66 | 2,66 |
| Kyllästysaste Sr, arvio [%] | 55 | 56 | 56 | 55 |
| Huokosluku e ₀ , arvio | 0,679 | 0,665 | 0,661 | 0,674 |
| Konsolidoituneena | | | | |
| Kokoonpuristuma [mm] | 0,026 | 0,090 | 0,191 | 0,258 |
| Näytteen korkeus [cm] | 4,01 | 4,00 | 4,02 | 4,02 |
| Huokosluku e, arvio | 0,678 | 0,661 | 0,653 | 0,663 |
| Kokeen lopussa | | | | |
| Kostea näyte [g] | 257,7 | 259,1 | 261,6 | 260,0 |
| Kuiva näyte [g] | 226,3 | 227,7 | 230,1 | 228,5 |
| Vesipitoisuus [%] | 13,9 | 13,8 | 13,7 | 13,8 |
| Huom | | | | |





Liite 4. Valimohiekka WFS + sideaineseosten ja puristuslujuuskoekappaleiden pöytäkirjat

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + CEM I

Sivu (1 / 2)

| PARANNETULLA PROCTOR:ILLA MÄÄRITETTY TIIVIYS JA OPTIMIVESIPITOISUUS SEOKSELLE (DOC = 100%) | | | | |
|--|--------|-------------------|---------|---|
| Märkämassa proctor-sylinterissä | | g | 1869 | |
| - Runkoaine: WFS | 100 % | g | 1578 | |
| - Runkoaine: - | 0 % | g | 0 | |
| - Sideaine: Pikasem. CEM I [p%] | 4 % | g | 61 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Vesi [p%] | 13,9 % | g | 230 | (painoprosenttia runko+sideaineesta -> g) |
| Näytteen halkaisija Φ | | mm | 101 | (sylinterin halkaisija) |
| Näytteen lopullinen korkeus h | | mm | 116 | (sylinterin korkeus) |
| Näytteen lopullinen tilavuus V | | cm ³ | 929,374 | |
| Lopullinen märkätiheys ρ | | g/cm ³ | 2,011 | |
| Lopullinen kuivatiheys ρ_d | | g/cm ³ | 1,766 | (märkätiheydestä ρ vähennetty w_{FI}) |
| Optimivesipitoisuus w_{FI} | | % | 13,87 | (uunikuivaamalla näyte) |

HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN VALMISTUKSESTA

| | |
|-----|---|
| 7 d | <p>Koekappaleet valmistettiin optimivesipitoisuutta korkeammalla vesipitoisuudella: 13,87% -> 14%.</p> <p>Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 7d koekappaleita valmistettaessa.</p> |
|-----|---|

HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN TOTEUTUNEISUUDESTA

| | |
|-----|--|
| 7 d | <p>Koekappaleiden korkeus h [mm] kiertotiivistyksen jälkeen perustuu koneen kalibrointiin. Koekappaleet tiivistettiin tavoitekorkeuteen.</p> <p>Koekappaleissa huomattavissa massan pienenemistä sadetushuoneessa.</p> |
|-----|--|

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + CEM I

Sivu (2 / 2)

| PERUSTIEDOT TAVOITELLULLE SEOKSELLE KOEKAPPALEESSA | | | |
|--|-------------------|---------|---------------------------|
| Tavoiteltu koekappaleen tilavuus | cm ³ | 942,478 | (h= 120 mm ; d= 100 mm) |
| Seosmassa: WFS+CEM | | 1-3 | |
| Näytteen märkämassa ennen tiivistystä | g | 1813,6 | |
| - Runkoaine: WFS 100 % | g | 1530 | |
| - Runkoaine: - 0 % | g | 0 | |
| - Sideaine: Pikasem. CEM I [p%] | % | 4 % | |
| | g | 61,19 | |
| - Vesi [p%] | % | 14,00 % | |
| | g | 223 | |
| Tavoiteltu kuivatiheys ρ_d | g/cm ³ | 1,688 | |
| Tavoiteltu koekappaleen tiiviysaste (DOC) | % | 95,6 | |

| PVM: 2019-04-18 | | TOTEUTUNEET KOEKAPPALEET ICT-KIERTOTIIVISTYKSEN JÄLKEEN | | | | | |
|-------------------------------------|----------------|---|--------------------------|--|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Koekappaleen halkaisija Φ [mm] | | 100 | | (ICT sylinterin halkaisija oletuksena) | | | |
| Nro [#] | Massa m [g] | ICT vuodon massa (vesi+h.a.) [g] | ICT Korkeus h [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm ³] | Työkierrosten lukumäärä [N] | Tiiviys- aste arvio DOC [%] |
| 1 | 1814,0 | 0 | 120 | 942478 | 1,925 | 72 | 95,6 % |
| 2 | 1814,0 | 0 | 120 | 942478 | 1,925 | 77 | 95,6 % |
| 3 | 1814,0 | 0 | 120 | 942478 | 1,925 | 55 | 95,6 % |

| PVM: 2019-04-25 | | | PURISTUSLUJUUS (UCS) 7 d | | | TUNNUS: WFS+CEM-1 | | | | |
|-----------------|----------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------|--------|-------|-------|-------|
| Nr [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus | KA. | STD. | COV |
| | | | | | | | [MPa] | | | |
| 1 | 1816,67 | 120,39 | 100,70 | 958825 | 1,8947 | 3,58748 | 0,450 | 0,443 | 0,039 | 8,8 % |
| 2 | 1813,48 | 120,45 | 100,75 | 960255 | 1,8885 | 3,19616 | 0,401 | | | |
| 3 | 1814,14 | 120,65 | 100,74 | 961659 | 1,8865 | 3,81182 | 0,478 | | | |

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + KPLT+A

Sivu (1 / 2)

| PARANNETULLA PROCTOR:ILLA MÄÄRITETTY TIIVIYS JA OPTIMIVESIPITOISUUS SEOKSELLE (DOC = 100%) | | | | |
|--|--------|-------------------|---------|--|
| Märkämassa proctor-sylinterissä | | g | 1865 | |
| - Runkoaine: WFS | 100 % | g | 1486 | |
| - Runkoaine: - | 0 % | g | 0 | |
| - Sideaine: KPLT [p%] | 12 % | g | 159 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Aktivaattori: - [p%] | 0 % | g | 0 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Vesi [p%] | 12,1 % | g | 220 | (painoprosenttia runko+sideaineesta -> g) |
| Näytteen halkaisija Φ | | mm | 101 | (sylinterin halkaisija) |
| Näytteen lopullinen korkeus h | | mm | 116 | (sylinterin korkeus) |
| Näytteen lopullinen tilavuus V | | cm ³ | 929,374 | |
| Lopullinen märkätiheys ρ | | g/cm ³ | 2,007 | |
| Lopullinen kuivatiheys ρ_d | | g/cm ³ | 1,791 | (märkätiheydestä ρ vähennetty w_{FI}) |
| Optimivesipitoisuus w_{FI} | | % | 12,06 | (uunikuivaamalla näyte) |

HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN VALMISTUKSESTA

| | |
|-----|---|
| 7 d | <p>Koekappaleiden maksimi tiiviys ja optimivesipitoisuus määritettiin parannetulla proctor-menetelmällä WFS + KPLT (12%) seokselle (koekappaleet 3-6). Määritetyt arvot keskimmaiselle seokselle skaalattiin rinnakkaisille seoksille 1-3 ja 4-6 analyyttisesti.</p> <p>Kaikki koekappaleet valmistettiin optimivesipitoisuudella: 12%.</p> <p>Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 7d koekappaleita valmistettaessa.</p> |
|-----|---|

HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN TOTEUTUNEISUUDESTA

| | |
|-----|--|
| 7 d | <p>Koekappaleiden tilavuudessa huomattavissa lievää laajentumista.</p> |
|-----|--|

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + KPLT+A

Sivu (2 / 2)

| PERUSTIEDOT TAVOITELLULLE SEOKSELLE KOEKAPPALEESSA | | | | |
|--|-------------------|---------|-------------------------|---------|
| Tavoiteltu koekappaleen tilavuus | cm ³ | 942,478 | (h= 120 mm ; d= 100 mm) | |
| Seosmassa: WFS+CEM | | 1-3 | 4-6 | 7-9 |
| Näytteen märkämassa ennen tiivistystä | g | 1813,9 | 1813,9 | 1813,9 |
| - Runkoaine: WFS 100 % | g | 1472,3 | 1446,0 | 1420,7 |
| - Runkoaine: - 0 % | g | 0 | 0 | 0 |
| - Sideaine: KPLT [p%] | % | 9 % | 11 % | 13 % |
| | g | 132,51 | 159,06 | 184,69 |
| - Aktivaattori: CEM I [p%] | % | 1 % | 1 % | 1 % |
| | g | 14,72 | 14,46 | 14,21 |
| - Vesi [p%] | % | 12,00 % | 12,00 % | 12,00 % |
| | g | 194,3 | 194,3 | 194,3 |
| Tavoiteltu kuivatiheys ρ_d | g/cm ³ | 1,718 | 1,718 | 1,718 |
| Tavoiteltu koekappaleen tiiviysaste (DOC) | % | 95,9 | 95,9 | 95,9 |

| PVM: 2019-04-29 | | TOTEUTUNEET KOEKAPPALEET ICT-KIERTOTIIVISTYKSEN JÄLKEEN | | | | | |
|-------------------------------------|----------------|---|--|----------------------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Koekappaleen halkaisija Φ [mm] | | 100 | (ICT sylinterin halkaisija oletuksena) | | | | |
| Nro [#] | Massa m [g] | ICT vuodon massa (vesi+h.a.) [g] | ICT Korkeus h [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm ³] | Työkierrosten lukumäärä [N] | Tiiviys- aste arvio DOC [%] |
| 1 | 1813,9 | 0 | 120 | 942478 | 1,925 | 38 | 95,9 % |
| 2 | 1813,9 | 0 | 120 | 942478 | 1,925 | 35 | 95,9 % |
| 3 | 1813,9 | 0 | 120 | 942478 | 1,925 | 38 | 95,9 % |
| 4 | 1813,9 | 0 | 120 | 942478 | 1,925 | 25 | 95,9 % |
| 5 | 1813,9 | 0 | 120 | 942478 | 1,925 | 25 | 95,9 % |
| 6 | 1813,9 | 0 | 120 | 942478 | 1,925 | 25 | 95,9 % |
| 7 | 1813,9 | 0 | 120 | 942478 | 1,925 | 16 | 95,9 % |
| 8 | 1813,9 | 0 | 120 | 942478 | 1,925 | 18 | 95,9 % |
| 9 | 1813,9 | 0 | 120 | 942478 | 1,925 | 18 | 95,9 % |

| PVM: 2019-05-06 | | PURISTUSLUJUUS (UCS) 7 d | | | | TUNNUS: WFS+KPLTA-(1-3) | | | | |
|-----------------|----------------|---------------------------------|---|----------------------------------|---|----------------------------|--------|-------|-------|-------|
| Nr [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus | KA. | STD. | COV |
| | | | | | | | [MPa] | | | |
| 1 | 1817,47 | 120,24 | 100,44 | 952691 | 1,9077 | 0,91078 | 0,115 | 0,114 | 0,002 | 2,0 % |
| 2 | 1816,05 | 120,21 | 100,35 | 950748 | 1,9101 | 0,91353 | 0,116 | | | |
| 3 | 1814,78 | 120,30 | 100,42 | 952787 | 1,9047 | 0,88089 | 0,111 | | | |
| 4 | 1817,23 | 120,31 | 100,46 | 953626 | 1,9056 | 0,81973 | 0,103 | 0,110 | 0,007 | 6,5 % |
| 5 | 1814,5 | 120,43 | 100,38 | 953057 | 1,9039 | 0,85959 | 0,109 | | | |
| 6 | 1814,26 | 120,52 | 100,37 | 953579 | 1,9026 | 0,92967 | 0,117 | | | |
| 7 | 1813,8 | 120,17 | 100,37 | 950810 | 1,9076 | 0,82867 | 0,105 | 0,107 | 0,009 | 8,3 % |
| 8 | 1814,03 | 120,35 | 100,47 | 954133 | 1,9012 | 0,92521 | 0,117 | | | |
| 9 | 1816,12 | 120,13 | 100,51 | 953147 | 1,9054 | 0,78847 | 0,099 | | | |

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + ECOLAN

Sivu (1 / 2)

| PARANNETULLA PROCTOR:ILLA MÄÄRITETTY TIIVIYS JA OPTIMIVESIPITOISUUS SEOKSELLE (DOC = 100%) | | | | |
|--|--------|-------------------|---------|--|
| Märkämassa proctor-sylinterissä | | g | 1871 | |
| - Runkoaine: WFS | 100 % | g | 1563 | |
| - Runkoaine: - | 0 % | g | 0 | |
| - Sideaine: ECOLAN [p%] | 6 % | g | 88 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Vesi [p%] | 13,0 % | g | 220 | (painoprosenttia runko+sideaineesta -> g) |
| Näytteen halkaisija Φ | | mm | 101 | (sylinterin halkaisija) |
| Näytteen lopullinen korkeus h | | mm | 116 | (sylinterin korkeus) |
| Näytteen lopullinen tilavuus V | | cm ³ | 929,374 | |
| Lopullinen märkätiheys ρ | | g/cm ³ | 2,014 | |
| Lopullinen kuivatiheys ρ_d | | g/cm ³ | 1,782 | (märkätiheydestä ρ vähennetty w_{FI}) |
| Optimivesipitoisuus w_{FI} | | % | 12,98 | (uunikuivaamalla näyte) |

HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN VALMISTUKSESTA

| | |
|-----|--|
| 7 d | <p>'Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 7d koekappaleita valmistettaessa.</p> <p>Koekappaleiden maksimi tiiviys ja optimivesipitoisuus määritettiin parannetulla proctor-menetelmällä WFS + ECOLAN (6%) seokselle (koekappaleet 3-6). Määritetyt arvot keskimmaiselle seokselle skaalattiin rinnakkaisille seoksille 1-3 ja 4-6 analyttisesti.</p> <p>'Kaikki koekappaleet valmistettiin optimivesipitoisuudella: 12,98% -> 13%.</p> |
|-----|--|

HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN TOTEUTUNEISUUDESTA

| | |
|-----|--|
| 7 d | |
|-----|--|

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + ECOLAN

Sivu (2 / 2)

| PERUSTIEDOT TAVOITELLULLE SEOKSELLE KOEKAPPALEESSA | | | | |
|--|-------------------|---------|-------------------------|---------|
| Tavoiteltu koekappaleen tilavuus | cm ³ | 942,478 | (h= 120 mm ; d= 100 mm) | |
| Seosmassa: WFS+CEM | | 1-3 | 4-6 | 7-9 |
| Näytteen märkämassa ennen tiivistystä | g | 1822,1 | 1822,1 | 1822,1 |
| - Runkoaine: WFS 100 % | g | 1550,48 | 1521,22 | 1493,05 |
| - Runkoaine: - 0 % | g | 0 | 0 | 0 |
| - Sideaine: Pikasem. CEM I [p%] | % | 4 % | 6 % | 8 % |
| | g | 62,02 | 91,27 | 119,44 |
| - Vesi [p%] | % | 13,00 % | 13,00 % | 13,00 % |
| | g | 209,6 | 209,6 | 209,6 |
| Tavoiteltu kuivatiheys ρ_d | g/cm ³ | 1,711 | 1,711 | 1,711 |
| Tavoiteltu koekappaleen tiiviysaste (DOC) | % | 96,0 | 96,0 | 96,0 |

| PVM: 2019-04-30 | | TOTEUTUNEET KOEKAPPALEET ICT-KIERTOTIIVISTYKSEN JÄLKEEN | | | | | |
|-------------------------------------|-------------|---|--|-------------------------------|---|-----------------------------|---------------------------|
| Koekappaleen halkaisija Φ [mm] | | 100 | (ICT sylinterin halkaisija oletuksena) | | | | |
| Nro [#] | Massa m [g] | ICT vuodon massa (vesi+h.a.) [g] | ICT Korkeus h [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkätiheys ρ [g/cm ³] | Työkierrosten lukumäärä [N] | Tiiviysaste arvio DOC [%] |
| 1 | 1822,1 | 0 | 120 | 942478 | 1,933 | 134 | 96,0 % |
| 2 | 1822,1 | 0 | 120 | 942478 | 1,933 | 119 | 96,0 % |
| 3 | 1822,1 | 0 | 120 | 942478 | 1,933 | 164 | 96,0 % |
| 4 | 1822,1 | 0 | 120 | 942478 | 1,933 | 65 | 96,0 % |
| 5 | 1822,1 | 0 | 120 | 942478 | 1,933 | 68 | 96,0 % |
| 6 | 1822,1 | 0 | 120 | 942478 | 1,933 | 70 | 96,0 % |
| 7 | 1822,1 | 0 | 120 | 942478 | 1,933 | 39 | 96,0 % |
| 8 | 1822,1 | 0 | 120 | 942478 | 1,933 | 38 | 96,0 % |
| 9 | 1822,1 | 0 | 120 | 942478 | 1,933 | 39 | 96,0 % |

| PVM: 2019-05-07 | | PURISTUSLUJUUS (UCS) 7 d | | | TUNNUS: WFS+ECO-(1-3) | | | | | |
|-----------------|-------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|---|----------------------|--------|-------|-------|-------|
| Nr [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkätiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus | KA. | STD. | COV |
| | | | | | | | [MPa] | | | |
| 1 | 1818,95 | 120,47 | 100,83 | 961941 | 1,8909 | 0,47588 | 0,060 | 0,061 | 0,003 | 4,7 % |
| 2 | 1814,13 | 120,56 | 100,80 | 962087 | 1,8856 | 0,47279 | 0,059 | | | |
| 3 | 1816,58 | 120,27 | 100,78 | 959392 | 1,8935 | 0,51367 | 0,064 | | | |
| 4 | 1820,86 | 120,45 | 100,84 | 961972 | 1,8928 | 1,01076 | 0,127 | 0,126 | 0,008 | 6,3 % |
| 5 | 1821,47 | 120,71 | 100,96 | 966344 | 1,8849 | 1,06848 | 0,133 | | | |
| 6 | 1822,51 | 120,63 | 100,81 | 962836 | 1,8929 | 0,93931 | 0,118 | | | |
| 7 | 1820,41 | 120,57 | 100,90 | 964076 | 1,8882 | 1,72223 | 0,215 | 0,213 | 0,004 | 2,0 % |
| 8 | 1818,77 | 121,00 | 100,75 | 964640 | 1,8854 | 1,71948 | 0,216 | | | |
| 9 | 1822,92 | 120,44 | 101,01 | 965138 | 1,8888 | 1,66795 | 0,208 | | | |

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + BPLT

Sivu (1 / 2)

| PARANNETULLA PROCTOR:ILLA MÄÄRITETTY TIIVIYS JA OPTIMIVESIPITOISUUS SEOKSELLE (DOC = 100%) | | | | |
|--|--------|-------------------|---------|--|
| Märkämassa proctor-sylinterissä | | g | 1874 | |
| - Runkoaine: WFS | 100 % | g | 1474 | |
| - Runkoaine: - | 0 % | g | 0 | |
| - Sideaine: BPLT [p%] | 12 % | g | 158 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Aktivaattori: - [p%] | 0 % | g | 0 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Vesi [p%] | 13,5 % | g | 242 | (painoprosenttia runko+sideaineesta -> g) |
| Näytteen halkaisija Φ | | mm | 101 | (sylinterin halkaisija) |
| Näytteen lopullinen korkeus h | | mm | 116 | (sylinterin korkeus) |
| Näytteen lopullinen tilavuus V | | cm ³ | 929,374 | |
| Lopullinen märkätiheys ρ | | g/cm ³ | 2,017 | |
| Lopullinen kuivatiheys ρ_d | | g/cm ³ | 1,776 | (märkätiheydestä ρ vähennetty w_{FI}) |
| Optimivesipitoisuus w_{FI} | | % | 13,54 | (uunikuivaamalla näyte) |

HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN VALMISTUKSESTA

| | |
|-----|--|
| 7 d | <p>Koekappaleiden maksimi tiiviys ja optimivesipitoisuus määritettiin parannetulla proctor-menetelmällä WFS + BPLT (12%) seokselle (koekappaleet 3-6). Määritetyt arvot keskimmaiselle seokselle skaalattiin rinnakkaisille seoksille 1-3 ja 4-6 analyttisesti.</p> <p>Kaikki koekappaleet valmistettiin optimivesipitoisuudella: 12%.</p> <p>Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 7d koekappaleita valmistettaessa.</p> |
|-----|--|

HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN TOTEUTUNEISUUDESTA

| | |
|-----|--|
| 7 d | <p>Koekappaleiden tilavuudessa huomattavissa lievää laajentumista.</p> |
|-----|--|

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + BPLT

Sivu (2 / 2)

| PERUSTIEDOT TAVOITELLULLE SEOKSELLE KOEKAPPALEESSA | | | | |
|--|-------------------|---------|-------------------------|---------|
| Tavoiteltu koekappaleen tilavuus | cm ³ | 942,478 | (h= 120 mm ; d= 100 mm) | |
| Seosmassa: WFS+CEM | | 1-3 | 4-6 | 7-9 |
| Näytteen märkämassa ennen tiivistystä | g | 1819,9 | 1819,9 | 1819,9 |
| - Runkoaine: WFS 100 % | g | 1464,1 | 1438,0 | 1412,7 |
| - Runkoaine: - 0 % | g | 0 | 0 | 0 |
| - Sideaine: BPLT [p%] | % | 10 % | 12 % | 14 % |
| | g | 146,41 | 172,55 | 197,78 |
| - Aktivaattori: - [p%] | % | 0 % | 0 % | 0 % |
| | g | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| - Vesi [p%] | % | 13,00 % | 13,00 % | 13,00 % |
| | g | 209,4 | 209,4 | 209,4 |
| Tavoiteltu kuivatiheys ρ_d | g/cm ³ | 1,709 | 1,709 | 1,709 |
| Tavoiteltu koekappaleen tiiviysaste (DOC) | % | 96,2 | 96,2 | 96,2 |

| PVM: 2019-04-29 | | TOTEUTUNEET KOEKAPPALEET ICT-KIERTOTIIVISTYKSEN JÄLKEEN | | | | | |
|-------------------------------------|----------------|---|--|----------------------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Koekappaleen halkaisija Φ [mm] | | 100 | (ICT sylinterin halkaisija oletuksena) | | | | |
| Nro [#] | Massa m [g] | ICT vuodon massa (vesi+h.a.) [g] | ICT Korkeus h [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm ³] | Työkierrosten lukumäärä [N] | Tiiviys- aste arvio DOC [%] |
| 1 | 1820,0 | 0 | 120 | 942478 | 1,931 | 100 | 96,2 % |
| 2 | 1820,0 | 0 | 120 | 942478 | 1,931 | 92 | 96,2 % |
| 3 | 1820,0 | 0 | 120 | 942478 | 1,931 | 108 | 96,2 % |
| 4 | 1820,0 | 0 | 120 | 942478 | 1,931 | 66 | 96,2 % |
| 5 | 1820,0 | 0 | 120 | 942478 | 1,931 | 68 | 96,2 % |
| 6 | 1820,0 | 0 | 120 | 942478 | 1,931 | 69 | 96,2 % |
| 7 | 1820,0 | 0 | 120 | 942478 | 1,931 | 43 | 96,2 % |
| 8 | 1820,0 | 0 | 120 | 942478 | 1,931 | 44 | 96,2 % |
| 9 | 1820,0 | 0 | 120 | 942478 | 1,931 | 71 | 96,2 % |
| 10 | 1820,0 | 0 | 120 | 942478 | 1,931 | 44 | 96,2 % |

| PVM: 2019-05-06 | | | PURISTUSLUJUUS (UCS) 7 d | | | TUNNUS: WFS+BPLT-(1-3) | | | | |
|-----------------|--------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|--|----------------------------|--------|-------|-------|------|
| Nr [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus | KA. | STD. | COV |
| | | | | | | | [MPa] | | | |
| 1 | RIKKOUTUI ENNEN PURISTUSKOETTA | | | | | | | - | - | - |
| 2 | RIKKOUTUI ENNEN PURISTUSKOETTA | | | | | | | | | |
| 3 | 1838,48 | 120,07 | 100,56 | 953619 | 1,9279 | 0,23434 | 0,030 | | | |
| 4 | RIKKOUTUI ENNEN PURISTUSKOETTA | | | | | | | - | - | - |
| 5 | RIKKOUTUI ENNEN PURISTUSKOETTA | | | | | | | | | |
| 6 | 1833,77 | 120,04 | 100,01 | 942981 | 1,9447 | 0,30031 | 0,038 | | | |
| 7 | 1828,94 | 120,36 | 100,27 | 950417 | 1,9244 | 0,34738 | 0,044 | 0,047 | 0,005 | 10 % |
| 8 | 1831,46 | 120,57 | 100,39 | 954355 | 1,9191 | 0,36113 | 0,046 | | | |
| 9 | 1835,15 | 119,15 | 100,30 | 941425 | 1,9493 | 0,42778 | 0,054 | | | |
| 10 | 1839,07 | 120,82 | 100,26 | 953859 | 1,9280 | 0,34635 | 0,044 | | | |

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + BPLT+A

Sivu (1 / 2)

| PARANNETULLA PROCTOR:ILLA MÄÄRITETTY TIIVIYS JA OPTIMIVESIPITOISUUS SEOKSELLE (DOC = 100%) | | | | |
|--|--------|-------------------|---------|---|
| Märkämassa proctor-sylinterissä | | g | 1874 | |
| - Runkoaine: WFS | 100 % | g | 1474 | |
| - Runkoaine: - | 0 % | g | 0 | |
| - Sideaine: BPLT [p%] | 12 % | g | 158 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Aktivaattori: - [p%] | 0 % | g | 0 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Vesi [p%] | 13,5 % | g | 242 | (painoprosenttia runko+sideaineesta -> g) |
| Näytteen halkaisija Φ | | mm | 101 | (sylinterin halkaisija) |
| Näytteen lopullinen korkeus h | | mm | 116 | (sylinterin korkeus) |
| Näytteen lopullinen tilavuus V | | cm ³ | 929,374 | |
| Lopullinen märkätiheys ρ | | g/cm ³ | 2,017 | |
| Lopullinen kuivatiheys ρ_d | | g/cm ³ | 1,776 | (märkätiheydestä p vähennetty w_{FI}) |
| Optimivesipitoisuus w_{FI} | | % | 13,54 | (uunikuivaamalla näyte) |

HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN VALMISTUKSESTA

| | |
|-----|--|
| 7 d | <p>WFS + BPLTA (11% + 1%) seoksen maksimi tiiviys ja optimivesipitoisuuden arvoina käytettiin WFS + BPLT (12%) seokselle määritettyjä arvoja.</p> <p>Kaikki koekappaleet valmistettiin optimivesipitoisuutta alhaisemmalla vesipitoisuudella: 13,54 -> 13%.</p> <p>Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 7d koekappaleita valmistettaessa.</p> |
|-----|--|

HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN TOTEUTUNEISUUDESTA

| | |
|-----|--|
| 7 d | <p>Koekappaleiden tilavuudessa huomattavissa lievää laajentumista.</p> <p>Koekappale #3 päässyt imemään kosteutta sadetushuoneessa.</p> <p>Muissa koekappaleissa havaittavissa myös lievää kosteuden imeytymistä sadetushuoneessa.</p> |
|-----|--|

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + BPLT+A

Sivu (2 / 2)

| PERUSTIEDOT TAVOITELLULLE SEOKSELLE KOEKAPPALEESSA | | | | | |
|--|-------------------|---------|---------------------------|--------|--|
| Tavoiteltu koekappaleen tilavuus | cm ³ | 942,478 | (h= 120 mm ; d= 100 mm) | | |
| Seosmassa: WFS+CEM | | 1-3 | 4-6 | 7-9 | |
| Näytteen märkämassa ennen tiivistystä | g | 1819,9 | 0,0 | 0,0 | |
| - Runkoaine: WFS 100 % | g | 1437,95 | 0,0 | 0,0 | |
| - Runkoaine: - 0 % | g | 0 | 0 | 0 | |
| - Sideaine: BPLT [p%] | % | 11 % | 0 % | 0 % | |
| | g | 158,17 | 0,00 | 0,00 | |
| - Aktivaattori: CEM I [p%] | % | 1 % | 0 % | 0 % | |
| | g | 14,38 | 0,00 | 0,00 | |
| - Vesi [p%] | % | 13,00 % | 0,00 % | 0,00 % | |
| | g | 209,4 | 0,0 | 0,0 | |
| Tavoiteltu kuivatiheys ρ_d | g/cm ³ | 1,709 | 0,000 | 0,000 | |
| Tavoiteltu koekappaleen tiiviysaste (DOC) | % | 96,2 | 0,0 | 0,0 | |

| PVM: 2019-05-08 | | TOTEUTUNEET KOEKAPPALEET ICT-KIERTOTIIVISTYKSEN JÄLKEEN | | | | | |
|-------------------------------------|-------------|---|--|-------------------------------|---|-----------------------------|---------------------------|
| Koekappaleen halkaisija Φ [mm] | | 100 | (ICT sylinterin halkaisija oletuksena) | | | | |
| Nro [#] | Massa m [g] | ICT vuodon massa (vesi+h.a.) [g] | ICT Korkeus h [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkätiheys ρ [g/cm ³] | Työkierrosten lukumäärä [N] | Tiiviysaste arvio DOC [%] |
| 1 | 1820,0 | 0 | 120 | 942478 | 1,931 | 48 | 96,2 % |
| 2 | 1820,0 | 0 | 120 | 942478 | 1,931 | 49 | 96,2 % |
| 3 | 1820,0 | 0 | 120 | 942478 | 1,931 | 51 | 96,2 % |
| 4 | 1820,0 | 0 | 120 | 942478 | 1,931 | 48 | 96,2 % |

| PVM: 2019-05-15 | | PURISTUSLUJUUS (UCS) 7 d | | | | TUNNUS: WFS+BPLTA-1 | | | | |
|-----------------|-------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|---|----------------------|--------------|-------|-------|------|
| Nr [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkätiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus [MPa] | KA. | STD. | COV |
| 1 | 1821 | 121,26 | 101,06 | 972671 | 1,8722 | 1,76385 | 0,220 | 0,204 | 0,022 | 11 % |
| 2 | 1824,26 | 121,19 | 100,94 | 969802 | 1,8811 | 1,75285 | 0,219 | | | |
| 3 | 1851,88 | 121,17 | 100,73 | 965612 | 1,9178 | 1,38318 | 0,174 | | | |
| 4 | 1825,85 | 121,01 | 100,75 | 964720 | 1,8926 | 1,62127 | 0,203 | | | |

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFSR + CEM I

Sivu (1 / 2)

| PARANNETULLA PROCTOR:ILLA MÄÄRITETTY TIIVIYS JA OPTIMIVESIPITOISUUS SEOKSELLE (DOC = 100%) | | | | |
|--|--------|-------------------|---------|--|
| Märkämassa proctor-sylinterissä | | g | 1869 | |
| - Runkoaine: WFS | 100 % | g | 1578 | |
| - Runkoaine: - | 0 % | g | 0 | |
| - Sideaine: Pikasem. CEM I [p%] | 4 % | g | 61 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Vesi [p%] | 13,9 % | g | 230 | (painoprosenttia runko+sideaineesta -> g) |
| Näytteen halkaisija Φ | | mm | 101 | (sylinterin halkaisija) |
| Näytteen lopullinen korkeus h | | mm | 116 | (sylinterin korkeus) |
| Näytteen lopullinen tilavuus V | | cm ³ | 929,374 | |
| Lopullinen märkätiheys ρ | | g/cm ³ | 2,011 | |
| Lopullinen kuivatiheys ρ_d | | g/cm ³ | 1,766 | (märkätiheydestä ρ vähennetty w_{FI}) |
| Optimivesipitoisuus w_{FI} | | % | 13,87 | (uunikuivaamalla näyte) |

HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN VALMISTUKSESTA

| | |
|-----|--|
| 7 d | <p>WFSR (elvytetty valimohiekka) + CEM I 4% seoksen maksimi tiiviys ja optimivesipitoisuuden arvoina käytettiin WFS + CEM I 4% seokselle määritettyjä arvoja.</p> <p>Koekappaleet valmistettiin WFS+CEM I 4%:lle määritettyä optimivesipitoisuutta korkeammalla vesipitoisuudella: 13,87% -> 14%.</p> <p>Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 7d koekappaleita valmistettaessa.</p> |
|-----|--|

HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN TOTEUTUNEISUUDESTA

| | |
|-----|---|
| 7 d | <p>Koekappale #1 imenyt kosteutta sadetushuoneessa.</p> <p>Koekappale #2 menettänyt kosteutta sadetushuoneessa.</p> |
|-----|---|

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFSR + CEM I

Sivu (2 / 2)

| PERUSTIEDOT TAVOITELLULLE SEOKSELLE KOEKAPPALEESSA | | | | | |
|--|-------------------|---------|---------------------------|--------|--|
| Tavoiteltu koekappaleen tilavuus | cm ³ | 942,478 | (h= 120 mm ; d= 100 mm) | | |
| Seosmassa: WFSR+CEM | | 1-3 | 4-6 | 7-9 | |
| Näytteen märkämassa ennen tiivistystä | g | 1821,5 | 0 | 0 | |
| - Runkoaine: WFSR 100 % | g | 1536 | 0 | 0 | |
| - Runkoaine: - 0 % | g | 0 | 0 | 0 | |
| - Sideaine: Pikasem. CEM I [p%] | % | 4 % | 0 | 0 | |
| | g | 61,46 | 0 | 0 | |
| - Vesi [p%] | % | 14,00 % | 0,00 % | 0,00 % | |
| | g | 224 | 0 | 0 | |
| Tavoiteltu kuivatiheys ρ_d | g/cm ³ | 1,695 | 0,000 | 0,000 | |
| Tavoiteltu koekappaleen tiiviysaste (DOC) | % | 96,0 | 0,0 | 0,0 | |

| PVM: 2019-05-14 | | TOTEUTUNEET KOEKAPPALEET ICT-KIERTOTIIVISTYKSEN JÄLKEEN | | | | | |
|-------------------------------------|----------------|---|--|----------------------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Koekappaleen halkaisija Φ [mm] | | 100 | (ICT sylinterin halkaisija oletuksena) | | | | |
| Nro [#] | Massa m [g] | ICT vuodon massa (vesi+h.a.) [g] | ICT Korkeus h [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm ³] | Työkierrosten lukumäärä [N] | Tiiviys- aste arvio DOC [%] |
| 1 | 1821,5 | 0 | 120 | 942478 | 1,933 | 153 | 96,0 % |
| 2 | 1821,5 | 0 | 120 | 942478 | 1,933 | 100 | 96,0 % |
| 3 | 1821,5 | 0 | 120 | 942478 | 1,933 | 139 | 96,0 % |

| PVM: 2019-05-21 | | | PURISTUSLUJUUS (UCS) 7 d | | | TUNNUS: WFSR+CEM-1 | | | | |
|-----------------|----------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------|-------------------------------|----------------------------|--------|-------|-------|-------|
| Nr [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus | KA. | STD. | COV |
| | | | | | | | [MPa] | | | |
| 1 | 1839,08 | 119,95 | 100,53 | 952098 | 1,9316 | 7,64515 | 0,963 | 0,947 | 0,016 | 1,7 % |
| 2 | 1810,63 | 119,61 | 100,64 | 951478 | 1,9030 | 7,40244 | 0,931 | | | |
| 3 | 1819,36 | 120,03 | 100,74 | 956717 | 1,9017 | 7,55006 | 0,947 | | | |

Liite 5. Valimohiekka WFS + kivituhka KaM 0/4 + pikasementtiseosten ja puristuslujuuskoekappaleiden pöytäkirjat

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + KaM 0/4 + CEM I

Sivu (1 / 4)

| ANALYYTTISESTI MÄÄRITETTY TIIVIYS JA OPTIMIVESIPITOISUUS SEOKSELLE (DOC = 100%) | | | | |
|---|-------------------|-------------------|--|--|
| Teoreettinen märkämassa proctor-sylinterissä | g | | | 2038,4 |
| - Runkoaine: WFS | ρ_d | g/cm ³ | | 1,69 (parannetulla proctorilla määritetty) |
| | 50 % | | | 0,845 (50% proctor-tiiviydestä) |
| - Runkoaine: KaM 0/4 | ρ_d | g/cm ³ | | 2,04 (parannetulla proctorilla määritetty) |
| | 50 % | | | 1,018 (50% proctor-tiiviydestä) |
| - Sideaine: Pikasem. CEM I [p%] | 4 % | g | | 70,23 (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Vesi [p%] | 11,6 % | g | | 212,372 (p-% runko+sideaineesta -> g) |
| - WFS + CEM I (4%) vesi [p%] | 14,0 % | | | |
| - KaM 0/4 vesi [p%] | 9,3 % | | | |
| ICT näytteen halkaisija Φ | mm | | | 100 (sylinterin halkaisija) |
| ICT näytteen korkeus h | mm | | | 120 (sylinterin korkeus) |
| ICT näytteen tilavuus V | cm ³ | | | 942,478 |
| Teoreettinen märkätiheys ρ | g/cm ³ | | | 2,163 |
| Teoreettinen kuivatiheys ρ_d | g/cm ³ | | | 1,938 (märkätiheydestä p vähennetty w_{FI}) |
| Teoreettinen optimivesipitoisuus w_{FI} | % | | | 11,63 |

| HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN VALMISTUKSESTA | |
|--|--|
| | <p>Maksimi kuivatiheys määritettiin seokselle analyyttisesti valimohiekalle WFS ja kivituhkalle KaM 0/4 parannetulla proctor-menetelmällä määritettyjen arvojen perusteella.</p> <p>$0,5 * 1,69 \text{ g/cm}^3 * (\text{ICT-sylinterin tilavuus}) = \text{valimohiekan WFS osuus seoksessa}$</p> <p>$0,5 * 2,036 \text{ g/cm}^3 * (\text{ICT-sylinterin tilavuus}) = \text{kivituhkan KaM 0/4 osuus seoksessa}$</p> <p>Optimi vesipitoisuus määritettiin seokselle analyyttisesti seokselle WFS + CEM I (4%) ja kivituhkalle KaM 0/4 parannetulla proctor-menetelmällä määritettyjen arvojen perusteella.</p> <p>$0,5 * [\text{WFS} + \text{CEM I (4\%)} \text{ vesipitoisuus} = 14\%] + 0,5 * [\text{KaM 0/4 optimivesipitoisuus} = 9,26\%] = 11,63$</p> |
| 7 d | Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 7d koekappaleita valmistettaessa. |
| 6 d | Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 7d koekappaleita valmistettaessa. |

| HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN TOTEUTUNEISUUDESTA | |
|--|--|
| 7 d | <p>Koekappaleiden korkeus h [mm] kiertotiivistyksen jälkeen perustuu koneen kalibrointiin. Koekappaleet tiivistettiin tavoitekorkeuteen.</p> <p>Koekappaleissa huomattavissa lievää laajenemista sadetushuoneessa.</p> |
| 6 d | <p>Koekappaleiden korkeus h [mm] kiertotiivistyksen jälkeen perustuu koneen kalibrointiin. Koekappaleet tiivistettiin tavoitekorkeuteen.</p> <p>Koekappaleissa huomattavissa lievää laajenemista sadetushuoneessa.</p> |

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + KaM 0/4 + CEM I

Sivu (2 / 4)

| PERUSTIEDOT TAVOITELLULLE SEOKSELLE KOEKAPPALEESSA | | | | |
|--|-------------------|---------|-------------------------|--|
| Tavoiteltu koekappaleen tilavuus | cm ³ | 942,478 | (h= 120 mm ; d= 100 mm) | |
| Seosmassa: WFS+CEM | | 1-3 | 4-6 | |
| Näytteen märkämassa ennen tiivistystä | g | 1851,00 | 1958,1 | |
| - Runkoaine: WFS 50 % | g | 723,71 | 765,58 | |
| - Runkoaine: KaM 0/4 50 % | g | 870,68 | 921,06 | |
| - Sideaine: Pikasem. CEM I [p%] | % | 4 % | 4 % | |
| | g | 63,78 | 67,47 | |
| - Vesi [p%] | % | 11,63 % | 11,63 % | |
| | g | 192,84 | 204 | |
| Tavoiteltu kuivatiheys ρ_d | g/cm ³ | 1,759 | 1,861 | |
| Tavoiteltu koekappaleen tiiviysaste (DOC) | % | 90,8 | 96,1 | |

| TOTEUTUNEET KOEKAPPALEET ICT-KIERTOTIIVISTYKSEN JÄLKEEN | | | | | | | | |
|---|---------|-------------|----------------------------------|--------------------|--|--|-----------------------------|----------------------------|
| Koekappaleen halkaisija Φ [mm] | | | | 100 | (ICT sylinterin halkaisija oletuksena) | | | |
| PVM. | Nro [#] | Massa m [g] | ICT vuodon massa (vesi+h.a.) [g] | ICT Korkeus h [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä-tiheys ρ [g/cm ³] | Työkierrosten lukumäärä [N] | Tiiviys-aste arvio DOC [%] |
| 2019-05-17 | 1 | 1851,0 | 0 | 119,5 | 938551 | 1,972 | 4 | 91,2 % |
| | 2 | 1851,0 | 0 | 119,5 | 938551 | 1,972 | 4 | 91,2 % |
| | 3 | 1851,0 | 0 | 119 | 934624 | 1,980 | 4 | 91,6 % |
| 2019-05-23 | 4 | 1958,1 | 0 | 119,8 | 940907 | 2,081 | 14 | 96,2 % |
| | 5 | 1958,1 | 0 | 119,8 | 940907 | 2,081 | 14 | 96,2 % |
| | 6 | 1958,1 | 0 | 119,9 | 941692 | 2,079 | 13 | 96,1 % |

| PVM. 2019-05-24 | | PURISTUSLUJUUS (UCS) 7 d | | | | TUNNUS: WFS-KaM0-4+CEM-1 | | | | |
|-----------------|-------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------|--------------|-------|------|-------|
| Nr [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä-tiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus [MPa] | KA. | STD. | COV |
| 1 | 1848,2 | 119,41 | 100,66 | 950264 | 1,9449 | 8,26792 | 1,039 | 1,056 | 0,02 | 1,6 % |
| 2 | 1847,26 | 119,54 | 100,70 | 952055 | 1,9403 | 8,40972 | 1,056 | | | |
| 3 | 1847,32 | 118,99 | 100,54 | 944666 | 1,9555 | 8,51237 | 1,072 | | | |

| PVM. 2019-05-29 | | PURISTUSLUJUUS (UCS) 6 d | | | | TUNNUS: WFS-KaM0-4+CEM-3 | | | | |
|-----------------|-------------|---------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--|--------------------------|--------------|-------|------|-------|
| Nr [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä-tiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus [MPa] | KA. | STD. | COV |
| 4 | 1946,36 | 120,17 | 100,74 | 957833 | 2,0320 | 10,8479 | 1,361 | 1,373 | 0,01 | 0,8 % |
| 5 | 1946,11 | 120,14 | 100,79 | 958545 | 2,0303 | 11,0142 | 1,380 | | | |
| 6 | 1947,03 | 120,20 | 100,78 | 958833 | 2,0306 | 10,9953 | 1,378 | | | |

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + KaM 0/4 + CEM I

Sivu (3 / 4)

| ANALYYTTISESTI MÄÄRITETTY TIIVIYS JA OPTIMIVESIPITOISUUS SEOKSELLE (DOC = 100%) | | | | |
|---|-----------------|-----------------|---------|--|
| Teoreettinen märkämassa proctor-sylinterissä | | g | 2110,4 | |
| - Runkoaine: WFS | ρ_d | g/cm^3 | 1,69 | (parannetulla proctorilla määritetty) |
| | 25 % | | 0,4225 | (50% proctor-tiiviydestä) |
| - Runkoaine: KaM 0/4 | ρ_d | g/cm^3 | 2,04 | (parannetulla proctorilla määritetty) |
| | 75 % | | 1,527 | (50% proctor-tiiviydestä) |
| - Sideaine: Pikasem. CEM I [p%] | 4 % | g | 73,49 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Vesi [p%] | 10,4 % | g | 199,589 | (p-% runko+sideaineesta -> g) |
| - WFS + CEM I (4%) vesi [p%] | 14,0 % | | | |
| - KaM 0/4 vesi [p%] | 9,3 % | | | |
| ICT näytteen halkaisija Φ | mm | | 100 | (sylinterin halkaisija) |
| ICT näytteen korkeus h | mm | | 120 | (sylinterin korkeus) |
| ICT näytteen tilavuus V | cm^3 | | 942,478 | |
| Teoreettinen märkätiheys p | g/cm^3 | | 2,239 | |
| Teoreettinen kuivatiheys ρ_d | g/cm^3 | | 2,027 | (märkätiheydestä p vähennetty w_{FI}) |
| Teoreettinen optimivesipitoisuus w_{FI} | % | | 10,445 | |

| HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN VALMISTUKSESTA | |
|--|---|
| | <p>Maksimi kuivatiheys määritettiin seokselle analyyttisesti valimohiekalle WFS ja kivituhkalle KaM 0/4 parannetulla proctor-menetelmällä määritettyjen arvojen perusteella.</p> <p>$0,25 * 1,69 \text{ g/cm}^3 * (\text{ICT-sylinterin tilavuus}) = \text{valimohiekan WFS osuus seoksessa}$</p> <p>$0,75 * 2,036 \text{ g/cm}^3 * (\text{ICT-sylinterin tilavuus}) = \text{kivituhkan KaM 0/4 osuus seoksessa}$</p> <p>Optimi vesipitoisuus määritettiin seokselle analyyttisesti seokselle WFS + CEM I (4%) ja kivituhkalle KaM 0/4 parannetulla proctor-menetelmällä määritettyjen arvojen perusteella.</p> <p>$0,25 * [\text{WFS} + \text{CEM I (4\%)}] \text{ vesipitoisuus} = 14\% + 0,75 * [\text{KaM 0/4 optimivesipitoisuus} = 9,26\%] = 10,445\%$</p> |
| 7 d | Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 7d koekappaleita valmistettaessa. |
| 6 d | Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 7d koekappaleita valmistettaessa. |

| HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN TOTEUTUNEISUUDESTA | |
|--|---|
| 7 d | <p>Koekappaleiden korkeus h [mm] kiertotiivistyksen jälkeen perustuu koneen kalibrointiin. Koekappaleet tiivistettiin tavoitekorkeuteen.</p> <p>Koekappaleissa huomattavissa massan pienenemistä sadetushuoneessa.</p> |
| 6 d | <p>Koekappaleiden korkeus h [mm] kiertotiivistyksen jälkeen perustuu koneen kalibrointiin. Koekappaleet tiivistettiin tavoitekorkeuteen.</p> <p>Koekappale #1 imenyt kosteutta sadetushuoneessa.</p> <p>Koekappaleissa #2 ja #3 huomattavissa massan pienenemistä sadetushuoneessa.</p> |

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + KaM 0/4 + CEM I

Sivu (4 / 4)

| PERUSTIEDOT TAVOITELLULLE SEOKSELLE KOEKAPPALEESSA | | | | | | | | | |
|--|-------------------|---------|---------|---------|----|------|-----|------|--|
| Tavoiteltu koekappaleen tilavuus | cm ³ | 942,478 | (h= | 120 | mm | ; d= | 100 | mm) | |
| Seosmassa: WFS+CEM | | 7-9 | 10-12 | | | | | | |
| Näytteen märkämassa ennen tiivistystä | g | 1882,31 | 2026,6 | | | | | | |
| - Runkoaine: WFS | 25 % | g | 355,53 | 382,79 | | | | | |
| - Runkoaine: KaM 0/4 | 75 % | g | 1283,22 | 1381,60 | | | | | |
| - Sideaine: Pikasem. CEM I [p%] | | % | 4 % | 4 % | | | | | |
| | | g | 65,55 | 70,58 | | | | | |
| - Vesi [p%] | | % | 10,45 % | 10,45 % | | | | | |
| | | g | 178,01 | 192 | | | | | |
| Tavoiteltu kuivatiheys ρ_d | g/cm ³ | 1,808 | 1,947 | | | | | | |
| Tavoiteltu koekappaleen tiiviysaste (DOC) | % | 89,2 | 96,0 | | | | | | |

| TOTEUTUNEET KOEKAPPALEET ICT-KIERTOTIIVISTYKSEN JÄLKEEN | | | | | | | | |
|---|------------|----------------|--|--------------------------|--|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Koekappaleen halkaisija Φ [mm] | | | | 100 | (ICT sylinterin halkaisija oletuksena) | | | |
| PVM. | Nro [#] | Massa m [g] | ICT vuodon massa (vesi+h.a.) [g] | ICT Korkeus h [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm ³] | Työkierrosten lukumäärä [N] | Tiiviys- aste arvio DOC [%] |
| 2019-05-17 | 7 | 1882,3 | 0 | 120 | 942478 | 1,997 | 0 | 89,2 % |
| | 8 | 1882,3 | 0 | 120 | 942478 | 1,997 | 0 | 89,2 % |
| | 9 | 1882,3 | 0 | 120 | 942478 | 1,997 | 0 | 89,2 % |
| 2019-05-23 | 10 | 2026,6 | 0 | 119,8 | 940907 | 2,154 | 9 | 96,2 % |
| | 11 | 2026,6 | 0 | 119,5 | 938551 | 2,159 | 10 | 96,4 % |
| | 12 | 2026,6 | 0 | 119,7 | 940122 | 2,156 | 10 | 96,3 % |

| PVM. 2019-05-24 | | | PURISTUSLUJUUS (UCS) 7 d | | | TUNNUS: WFS-KaM0-4+CEM-2 | | | | |
|-----------------|----------------|---------------------------------|---|----------------------------------|---|----------------------------|-----------------|-------|------|-------|
| Nr [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus [MPa] | KA. | STD. | COV |
| 7 | 1877,48 | 118,92 | 100,35 | 940545 | 1,9962 | 11,4687 | 1,450 | 1,440 | 0,04 | 2,5 % |
| 8 | 1878,38 | 118,70 | 100,51 | 941801 | 1,9945 | 11,6554 | 1,469 | | | |
| 9 | 1879,15 | 118,69 | 100,46 | 940785 | 1,9974 | 11,0979 | 1,400 | | | |

| PVM. 2019-05-29 | | | PURISTUSLUJUUS (UCS) 6 d | | | TUNNUS: WFS-KaM0-4+CEM-4 | | | | |
|-----------------|----------------|---------------------------------|---|----------------------------------|---|----------------------------|-----------------|-------|------|-------|
| Nr [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus [MPa] | KA. | STD. | COV |
| 10 | 2030,51 | 119,98 | 100,59 | 953473 | 2,1296 | 16,7596 | 2,109 | 2,122 | 0,04 | 1,7 % |
| 11 | 2017,05 | 119,54 | 100,69 | 951866 | 2,1190 | 17,2255 | 2,163 | | | |
| 12 | 2017,36 | 119,70 | 100,57 | 950870 | 2,1216 | 16,6431 | 2,095 | | | |

Liite 6. Valimohiekka WFS + kalliomurske KaM 0/20 + sideaineseosten ja puristuslujuuskokappaleiden pöytäkirjat

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + KaM 0/20 + CEM I

Sivu (1 / 2)

| ICT:LLÄ MÄÄRITETTY TIIVIYS JA OPTIMIVESIPITOISUUS SEOKSELLE (TIIVIYSASTE DOC = 100%) | | | |
|--|-------------------|-----------------|---|
| Työkierrosten lukumäärä | N | 512 + 256 = 768 | (ultimaattinen korkeus tiiviydelle) |
| Näytteen märkämassa ennen tiivistystä ICT:llä | g | 2399 | |
| - Runkoaine: WFS | 25 % | g | 534 |
| - Runkoaine: KaM 0/20 | 75 % | g | 1601 |
| - Sideaine: Pikasem. CEM I [p%] | 4 % | g | 85 (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Aktivaattori: - [p%] | 0 % | g | 0 (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Vesi [p%] | 8,1 % | g | 180 (painoprosenttia runko+sideaineesta -> g) |
| Näytteen massa tiivistyksen jälkeen | g | 2322,7 | |
| Vuotaneen veden ja hienoaineksen massa | g | 76,70 | (tiivistyksen aikana ICT muotista) |
| Näytteen halkaisija Φ | mm | 100 | (sylinterin halkaisija) |
| Näytteen lopullinen korkeus h | mm | 126,94 | (luettu ICT:n ohjelmasta, 768 kierron jälk.) |
| Näytteen lopullinen tilavuus V | cm ³ | 997,011 | |
| Lopullinen märkätiheys ρ | g/cm ³ | 2,330 | |
| Lopullinen kuivatiheys ρ_d | g/cm ³ | 2,212 | (märkätiheydestä ρ vähennetty w_{FI}) |
| Optimivesipitoisuus w_{FI} | % | 5,31 | (uunikuvaamalla näyte) |

| HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN VALMISTUKSESTA | |
|--|--|
| 7 d | Koekappaleet valmistettiin optimivesipitoisuutta korkeammalla vesipitoisuudella 5,31% -> 6%. Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 7d koekappaleita valmistettaessa. |
| 28 d | Koekappaleet valmistettiin optimivesipitoisuutta korkeammalla vesipitoisuudella 5,31% -> 6%. Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 28d koekappaleita valmistettaessa. |
| 84 d | Koekappaleet valmistettiin optimivesipitoisuutta korkeammalla vesipitoisuudella 5,31% -> 6%. Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 28d koekappaleita valmistettaessa. |

| HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN TOTEUTUNEISUUDESTA | |
|--|---|
| 7 d | Koekappaleet menettivät osan kosteuspitoisuudestaan sadetushuoneessa. Koekappaleiden tilavuudessa huomattavissa lievää laajentumista. |
| 28 d | Koekappaleet menettivät osan kosteuspitoisuudestaan sadetushuoneessa. Koekappaleiden tilavuudessa huomattavissa lievää laajentumista. |
| 84 d | |

| PERUSTIEDOT TAVOITELLULLE SEOKSELLE KOEKAPPALEESSA | | | |
|--|-------------------|---------|---|
| Seosmassa: | WFS+CR+CEM | | |
| Näytteen märkämassa ennen tiivistystä | g | 2121 | (tavoiteltu) |
| - Runkoaine: WFS | 25 % | g | 481 |
| - Runkoaine: KaM 0/20 | 75 % | g | 1443 |
| - Sideaine: Pikasem. CEM I [p%] | 4 % | g | 77 (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Aktivaattori: - [p%] | 0 % | g | 0 (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Vesi [p%] | 6,00 % | g | 120 (painoprosenttia runko+sideaineesta -> g) |
| Tavoiteltu koekappaleen tilavuus | cm ³ | 942,478 | (h= 120 mm ; d= 100 mm) |
| Tavoiteltu kuivatiheys ρ_d | g/cm ³ | 2,124 | |
| Tavoiteltu koekappaleen tiiviysaste (DOC) | % | 96,0 | (tavoitteellinen tiiviysaste) |

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + KaM 0/20 + CEM I

Sivu (2 / 2)

| TOTEUTUNEET KOEKAPPALEET ICT-KIERTOTIIVISTYKSEN JÄLKEEN | | | | | | | | |
|---|------------|----------------|--|--------------------------|--|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Koekappaleen halkaisija Φ [mm] | | | | 100 | (ICT sylinterin halkaisija oletuksena) | | | |
| | Nro [#] | Massa m [g] | ICT vuodon massa (vesi+h.a.) [g] | ICT Korkeus h [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm ³] | Työkierrosten lukumäärä [N] | Tiiviys- aste arvio DOC [%] |
| VALMISTUS PVM. | 1 | 2119,7 | 0 | 119,9 | 941692 | 2,251 | 23 | 96,0 |
| | 2 | 2119,6 | 0 | 119,8 | 940907 | 2,253 | 23 | 96,1 |
| 2019-07-04 | 3 | 2119,1 | 0 | 120 | 942478 | 2,248 | 23 | 95,9 |
| VALMISTUS PVM. | 4 | 2119,2 | 0 | 119,9 | 941692 | 2,250 | 27 | 96,0 |
| | 5 | 2119,2 | 0 | 119,9 | 941692 | 2,250 | 25 | 96,0 |
| 2019-07-02 | 6 | 2119,6 | 0 | 119,9 | 941692 | 2,251 | 27 | 96,0 |
| VALMISTUS PVM. | 7 | 2118,8 | 0 | 119,9 | 941692 | 2,250 | 24 | 96,0 |
| | 8 | 2118,1 | 0 | 119,9 | 941692 | 2,249 | 26 | 95,9 |
| 2019-07-03 | 9 | 2118,6 | 0 | 119,9 | 941692 | 2,250 | 21 | 96,0 |

| PURISTUSLUJUUS (UCS) | | | | 7 | d | TUNNUS: WFS+KaM0-20+CEM-1 | | |
|----------------------|------------|----------------|---------------------------------|---|----------------------------------|---|----------------------------|-----------------|
| | Nro [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus [MPa] |
| PURISTUS PVM. | 1 | 2116,75 | 119,83 | 100,34 | 947553 | 2,2339 | 44,1 | 5,577 |
| | 2 | 2116,03 | 119,26 | 100,57 | 947374 | 2,2336 | 42,9 | 5,400 |
| 2019-07-11 | 3 | 2116,09 | 119,87 | 100,34 | 947870 | 2,2325 | 46,54 | 5,886 |
| | KA. | | | | | | | 5,621 |
| | STD. | | | | | | | 0,25 |
| | COV. | | | | | | | 4,37 % |

| PURISTUSLUJUUS (UCS) | | | | 28 | d | TUNNUS: WFS+KaM0-20+CEM-2 | | |
|----------------------|------------|----------------|---------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------|
| | Nro [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Tiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus [MPa] |
| PURISTUS PVM. | 4 | 2133,81 | 120,02 | 100,47 | 951516 | 2,24254 | 52,2 | 6,584 |
| | 5 | 2126,6 | 119,67 | 100,36 | 946665 | 2,24641 | 50,32 | 6,361 |
| 2019-07-30 | 6 | 2131,92 | 119,55 | 100,46 | 947602 | 2,24981 | 47,81 | 6,032 |
| | KA. | | | | | | | 6,326 |
| | STD. | | | | | | | 0,28 |
| | COV. | | | | | | | 4,39 % |

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + KaM 0/20 + KPLT + A

Sivu (1 / 2)

| ICT:LLÄ MÄÄRITETTY TIIVIYS JA OPTIMIVESIPITOISUUS SEOKSELLE (TIIVIYSASTE DOC = 100%) | | | | |
|--|-------------------|-----------------|--|--|
| Työkierrosten lukumäärä | N | 256 + 256 = 512 | (ultimaattinen korkeus tiiviydelle) | |
| Näytteen märkämässä ennen tiivistystä ICT:llä | g | 2323 | | |
| - Runkoaine: WFS | 25 % | g | 481 | |
| - Runkoaine: KaM 0/20 | 75 % | g | 1444 | |
| - Sideaine: KPLT [p%] | 10 % | g | 192 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Aktivaattori: CEM I [p%] | 2 % | g | 38 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Vesi [p%] | 7,75 % | g | 167 | (painoprosenttia runko+sideaineesta -> g) |
| Näytteen massa tiivistyksen jälkeen | g | 2264,2 | | |
| Vuotaneen veden ja hienoaineksen massa | g | 58,52 | (tiivistyksen aikana ICT muotista) | |
| Näytteen halkaisija Φ | mm | 100 | (sylinterin halkaisija) | |
| Näytteen lopullinen korkeus h | mm | 124,30 | (luettu ICT:n ohjelmasta, 512 kierron jälk.) | |
| Näytteen lopullinen tilavuus V | cm ³ | 976,250 | | |
| Lopullinen märkätiheys p | g/cm ³ | 2,319 | | |
| Lopullinen kuivatiheys ρ_d | g/cm ³ | 2,203 | (märkätiheydestä p vähennetty w_{FI}) | |
| Optimivesipitoisuus w_{FI} | % | 5,29 | (uunikuivaamalla näyte) | |

| HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN VALMISTUKSESTA | |
|--|--|
| 7 d | Koekappaleet valmistettiin optimivesipitoisuutta korkeammalla vesipitoisuudella (5,3% -> 6,0%). Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 7d koekappaleita valmistettaessa. |
| 28 d | Koekappaleet valmistettiin optimivesipitoisuutta korkeammalla vesipitoisuudella (5,3% -> 6,0%). Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 7d koekappaleita valmistettaessa. |
| 84 d | |

| HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN TOTEUTUNEISUUDESTA | |
|--|--|
| 7 d | Koekappaleet 2 ja 3 menettivät osan ja koekappale 1 oli imenyt kosteutta sadetushuoneessa. Koekappaleiden tilavuudessa huomattavissa lievää laajentumista. |
| 28 d | Koekappaleet imivät kosteutta sadetushuoneessa. Koekappaleiden tilavuudessa huomattavissa lievää laajentumista. |
| 84 d | |

| PERUSTIEDOT TAVOITTELLULLE SEOKSELLE KOEKAPPALEESSA | | | | |
|---|-------------------|---------|---------------------------------|--|
| Seosmassa: | WFS+KaM+KPLT+A | | | |
| Näytteen märkämässä ennen tiivistystä | g | 2113 | (tavoiteltu) | |
| - Runkoaine: WFS | 25 % | g | 445 | |
| - Runkoaine: KaM 0/20 | 75 % | g | 1335 | |
| - Sideaine: KPLT [p%] | 10 % | g | 178 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Aktivaattori: CEM I [p%] | 2 % | g | 36 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Vesi [p%] | 6,00 % | g | 120 | (painoprosenttia runko+sideaineesta -> g) |
| Tavoiteltu koekappaleen tilavuus | cm ³ | 942,478 | (h = 120 mm ; d = 100 mm) | |
| Tavoiteltu kuivatiheys ρ_d | g/cm ³ | 2,115 | | |
| Tavoiteltu koekappaleen tiiviysaste (DOC) | % | 96,0 | (tavoitteellinen tiiviysaste) | |

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + KaM 0/20 + KPLT + A

Sivu (2 / 2)

| TOTEUTUNEET KOEKAPPALEET VALMISTUKSEN JÄLKEEN | | | | | | | | |
|---|------------|----------------|--|--------------------------|--|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Koekappaleen halkaisija Φ [mm] | | | | 100 | (ICT sylinterin halkaisija oletuksena) | | | |
| | Nro [#] | Massa m [g] | ICT vuodon massa (vesi+h.a.) [g] | ICT Korkeus h [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm ³] | Työkierrosten lukumäärä [N] | Tiiviys- aste arvio DOC [%] |
| VALMISTUS PVM. | 1 | 2112,7 | 0 | 120 | 942478 | 2,242 | 79 | 96,0 |
| | 2 | 2112,5 | 0 | 120 | 942478 | 2,241 | 80 | 96,0 |
| 2019-06-18 | 3 | 2112,8 | 0 | 120 | 942478 | 2,242 | 84 | 96,0 |
| VALMISTUS PVM. | 4 | 2112,9 | 0 | 120 | 942478 | 2,242 | 53 | 96,0 |
| | 5 | 2111,5 | 0 | 120 | 942478 | 2,240 | 69 | 96,0 |
| 2019-07-02 | 6 | 2112,6 | 0 | 120 | 942478 | 2,242 | 77 | 96,0 |
| VALMISTUS PVM. | 7 | 2112 | 0 | 120 | 942478 | 2,241 | 70 | 96,0 |
| | 8 | 2111,9 | 0 | 120 | 942478 | 2,241 | 78 | 96,0 |
| 2019-07-03 | 9 | 2112,9 | 0 | 120 | 942478 | 2,242 | 75 | 96,0 |

| PURISTUSLUJUUS (UCS) | | | | 7 | d | TUNNUS: WFS+KaM0-20+KPLTA-1 | | |
|----------------------|------------|----------------|---------------------------------|---|----------------------------------|---|----------------------------|-----------------|
| | Nro [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus [MPa] |
| PURISTUS PVM. | 1 | 2119,93 | 120,31 | 100,34 | 951259 | 2,2286 | 23,48 | 2,970 |
| | 2 | 2109,32 | 120,08 | 100,06 | 944212 | 2,2339 | 28,73 | 3,654 |
| 2019-06-25 | 3 | 2108,75 | 120,06 | 100,15 | 945817 | 2,2296 | 26,34 | 3,343 |
| | KA. | | | | | | | 3,322 |
| | STD. | | | | | | | 0,34 |
| | COV. | | | | | | | 10,31 % |

| PURISTUSLUJUUS (UCS) | | | | 28 | d | TUNNUS: WFS+KaM0-20+KPLTA-2 | | |
|----------------------|------------|----------------|---------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------|
| | Nro [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Tiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus [MPa] |
| PURISTUS PVM. | 4 | 2135,1 | 119,98 | 100,1 | 944206 | 2,26126 | 36,28 | 4,610 |
| | 5 | 2119,92 | 119,93 | 100,17 | 945133 | 2,24299 | 37,21 | 4,722 |
| 2019-07-30 | 6 | 2123,54 | 120,06 | 100,06 | 944081 | 2,24932 | 36,42 | 4,632 |
| | KA. | | | | | | | 4,654 |
| | STD. | | | | | | | 0,06 |
| | COV. | | | | | | | 1,27 % |

| ICT:LLÄ MÄÄRITETTY TIIVIYS JA OPTIMIVESIPITOISUUS SEOKSELLE (TIIVIYSASTE DOC = 100%) | | | | |
|--|-------------------|-----------------|--|---|
| Työkierrosten lukumäärä | N | 512 + 256 = 768 | (ultimaattinen korkeus tiiviydelle) | |
| Näytteen märkämässä ennen tiivistystä ICT:llä | g | 2200 | | |
| - Runkoaine: WFS | 25 % | g | 476 | |
| - Runkoaine: KaM 0/20 | 75 % | g | 1428 | |
| - Sideaine: ECOLAN [p%] | 8 % | g | 152 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Aktivaattori: - [p%] | 0 % | g | 0 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Vesi [p%] | 7,00 % | g | 144 | (painoprosenttia runko+sideaineesta -> g) |
| Näytteen massa tiivistyksen jälkeen | g | 2136,8 | | |
| Vuotaneen veden ja hienoaineksen massa | g | 63,40 | (tiivistyksen aikana ICT muotista) | |
| Näytteen halkaisija Φ | mm | 100 | (sylinterin halkaisija) | |
| Näytteen lopullinen korkeus h | mm | 114,70 | (luettu ICT:n ohjelmasta, 512 kierron jälk.) | |
| Näytteen lopullinen tilavuus V | cm ³ | 900,852 | | |
| Lopullinen märkätiheys p | g/cm ³ | 2,372 | | |
| Lopullinen kuivatiheys ρ_d | g/cm ³ | 2,263 | (märkätiheydestä p vähennetty w_{FI}) | |
| Optimivesipitoisuus w_{FI} | % | 4,80 | (uunikuivaamalla näyte) | |

| HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN VALMISTUKSESTA | |
|--|--|
| 7 d | Koekappaleet valmistettiin optimivesipitoisuutta korkeammalla vesipitoisuudella (4,8 % -> 6,0%). Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja koekappaleita valmistettaessa. |
| 28 d | Koekappaleet valmistettiin optimivesipitoisuutta korkeammalla vesipitoisuudella (4,8 % -> 6,0%). Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja koekappaleita valmistettaessa. |
| 84 d | |

| HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN TOTEUTUNEISUUDESTA | |
|--|---|
| 7 d | Koekappaleet menettivät osan kosteuspitoisuudestaan sadetushuoneessa. Koekappaleiden tilavuudessa huomattavissa lievää laajentumista. |
| 28 d | Koekappaleet menettivät osan kosteuspitoisuudestaan sadetushuoneessa. Koekappaleiden tilavuudessa huomattavissa lievää laajentumista. |
| 84 d | |

| PERUSTIEDOT TAVOITELLULLE SEOKSELLE KOEKAPPALEESSA | | | | |
|--|-------------------|---------|---------------------------------|---|
| Seosmassa: | WFS+KaM+KPLT+A | | | |
| Näytteen märkämässä ennen tiivistystä | g | 2170 | (tavoiteltu) | |
| - Runkoaine: WFS | 25 % | g | 474 | |
| - Runkoaine: KaM 0/20 | 75 % | g | 1422 | |
| - Sideaine: ECOLAN [p%] | 8 % | g | 152 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Aktivaattori: - [p%] | 0 % | g | 0 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Vesi [p%] | 6,000 % | g | 123 | (painoprosenttia runko+sideaineesta -> g) |
| Tavoiteltu koekappaleen tilavuus | cm ³ | 942,478 | (h = 120 mm ; d = 100 mm) | |
| Tavoiteltu kuivatiheys ρ_d | g/cm ³ | 2,173 | | |
| Tavoiteltu koekappaleen tiiviysaste (DOC) | % | 96,0 | (tavoitteellinen tiiviysaste) | |

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + KaM 0/20 + ECOLAN

Sivu (2 / 2)

| TOTEUTUNEET KOEKAPPALEET ICT-KIERTOTIIVISTYKSEN JÄLKEEN | | | | | | | | |
|---|------------|----------------|--|--------------------------|--|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Koekappaleen halkaisija Φ [mm] | | | | 100 | (ICT sylinterin halkaisija oletuksena) | | | |
| | Nro [#] | Massa m [g] | ICT vuodon massa (vesi+h.a.) [g] | ICT Korkeus h [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm ³] | Työkierrosten lukumäärä [N] | Tiiviys- aste arvio DOC [%] |
| VALMISTUS PVM. | 1 | 2167,3 | 0 | 120 | 942478 | 2,300 | 96 | 95,9 |
| | 2 | 2164,4 | 0 | 120 | 942478 | 2,296 | 113 | 95,7 |
| 2019-07-04 | 3 | 2166,6 | 0 | 120 | 942478 | 2,299 | 64 | 95,8 |
| VALMISTUS PVM. | 4 | 2167,5 | 0 | 120 | 942478 | 2,300 | 61 | 95,9 |
| | 5 | 2165,5 | 0 | 120 | 942478 | 2,298 | 100 | 95,8 |
| 2019-07-02 | 6 | 2166,5 | 0 | 120 | 942478 | 2,299 | 85 | 95,8 |
| VALMISTUS PVM. | 7 | 2164,5 | 0 | 120 | 942478 | 2,297 | 87 | 95,7 |
| | 8 | 2166,3 | 0 | 120 | 942478 | 2,299 | 136 | 95,8 |
| 2019-07-03 | 9 | 2167 | 0 | 120 | 942478 | 2,299 | 96 | 95,8 |

| PURISTUSLUJUUS (UCS) | | | | 7 | d | TUNNUS: WFS+KaM0-20+ECOLAN-1 | | |
|----------------------|------------|----------------|---------------------------------|---|----------------------------------|---|----------------------------|-----------------|
| | Nro [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus [MPa] |
| PURISTUS PVM. | 1 | 2163,79 | 120,11 | 100,44 | 951661 | 2,2737 | 38,82 | 4,900 |
| | 2 | 2161,06 | 119,99 | 100,39 | 949764 | 2,2754 | 36,62 | 4,626 |
| 2019-07-11 | 3 | 2163,72 | 120,07 | 100,52 | 952861 | 2,2708 | 33,75 | 4,253 |
| | KA. | | | | | | | 4,593 |
| | STD. | | | | | | | 0,32 |
| | COV. | | | | | | | 7,07 % |

| PURISTUSLUJUUS (UCS) | | | | 28 | d | TUNNUS: WFS+KaM0-20+ECOLAN-2 | | |
|----------------------|------------|----------------|---------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------|
| | Nro [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Tiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus [MPa] |
| PURISTUS PVM. | 4 | 2178,34 | 120,23 | 100,68 | 957170 | 2,27581 | 42,99 | 5,400 |
| | 5 | 2167,62 | 120,07 | 100,62 | 954757 | 2,27034 | 47,16 | 5,931 |
| 2019-07-30 | 6 | 2167,18 | 120,47 | 100,58 | 957177 | 2,26414 | 55,59 | 6,997 |
| | KA. | | | | | | | 6,109 |
| | STD. | | | | | | | 0,81 |
| | COV. | | | | | | | 13,31 % |

| PURISTUSLUJUUS (UCS) | | | | 84 | d | TUNNUS: WFS+KaM0-20+ECOLAN-2 | | |
|----------------------|------------|----------------|---------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------|
| | Nro [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Tiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus [MPa] |
| PURISTUS PVM. | 7 | | | | | | | |
| | 8 | | | | | | | |
| 2019-09-25 | 9 | | | | | | | |
| | KA. | | | | | | | |
| | STD. | | | | | | | |
| | COV. | | | | | | | |

| ICT:LLÄ MÄÄRITETTY TIIVIYS JA OPTIMIVESIPITOISUUS SEOKSELLE (TIIVIYSASTE DOC = 100%) | | | | |
|--|-------------------|-----------------|--|---|
| Työkierrosten lukumäärä | N | 512 + 256 = 768 | (ultimaattinen korkeus tiiviydelle) | |
| Näytteen märkämässä ennen tiivistystä ICT:llä | g | 2220 | | |
| - Runkoaine: WFS | 25 % | g | 472 | |
| - Runkoaine: KaM 0/20 | 75 % | g | 1415 | |
| - Sideaine: BPLT [p%] | 8 % | g | 151 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Aktivaattori: CEM I [p%] | 2 % | g | 38 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Vesi [p%] | 7,00 % | g | 145 | (painoprosenttia runko+sideaineesta -> g) |
| Näytteen massa tiivistyksen jälkeen | g | 2151,3 | | |
| Vuotaneen veden ja hienoaineksen massa | g | 68,75 | (tiivistyksen aikana ICT muotista) | |
| Näytteen halkaisija Φ | mm | 100 | (sylinterin halkaisija) | |
| Näytteen lopullinen korkeus h | mm | 117,10 | (luettu ICT:n ohjelmasta, 512 kierron jälk.) | |
| Näytteen lopullinen tilavuus V | cm ³ | 919,701 | | |
| Lopullinen märkätiheys p | g/cm ³ | 2,339 | | |
| Lopullinen kuivatiheys ρ_d | g/cm ³ | 2,225 | (märkätiheydestä p vähennetty w_{FI}) | |
| Optimivesipitoisuus w_{FI} | % | 5,11 | (uunikuivaamalla näyte) | |

| HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN VALMISTUKSESTA | |
|--|---|
| 7 d | Koekappaleet valmistettiin optimivesipitoisuutta korkeammalla vesipitoisuudella (5,11 % -> 6,00 %). Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 7d koekappaleita valmistettaessa. |
| 28 d | Koekappaleet valmistettiin optimivesipitoisuutta korkeammalla vesipitoisuudella (5,11 % -> 6,00 %). Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 28d koekappaleita valmistettaessa. |
| 84 d | Koekappaleet valmistettiin optimivesipitoisuutta korkeammalla vesipitoisuudella (5,11 % -> 6,00 %). Kiertotiivistys ei aiheuttanut vuotoja 28d koekappaleita valmistettaessa. |

| HUOMIOITAVAA KOEKAPPALEIDEN TOTEUTUNEISUUDESTA | |
|--|---|
| 7 d | Koekappaleet imivät kosteutta sadetushuoneessa itseensä. Koekappaleiden tilavuudessa huomattavissa lievää laajentumista. |
| 28 d | Koekappaleet imivät kosteutta sadetushuoneessa itseensä. Koekappaleiden tilavuudessa huomattavissa lievää laajentumista. |
| 84 d | |

| PERUSTIEDOT TAVOITELLULLE SEOKSELLE KOEKAPPALEESSA | | | | |
|--|-------------------|---------|-------------------------------------|---|
| Seosmassa: | WFS+KaM+BPLT+A | | | |
| Näytteen märkämässä ennen tiivistystä | g | 2134 | (tavoiteltu) | |
| - Runkoaine: WFS | 25 % | g | 458 | |
| - Runkoaine: KaM 0/20 | 75 % | g | 1373 | |
| - Sideaine: BPLT [p%] | 8 % | g | 146 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Aktivaattori: CEM I [p%] | 2 % | g | 37 | (painoprosenttia runkoaineesta -> g) |
| - Vesi [p%] | 6,000 % | g | 121 | (painoprosenttia runko+sideaineesta -> g) |
| Tavoiteltu koekappaleen tilavuus | cm ³ | 942,478 | (h = 120 mm ; d = 100 mm) | |
| Tavoiteltu kuivatiheys ρ_d | g/cm ³ | 2,136 | | |
| Tavoiteltu koekappaleen tiiviysaste (DOC) | % | 96,0 | (tavoitteellinen tiiviysaste arvio) | |

SEOKSEN JA KOEKAPPALEIDEN PÖYTÄKIRJA: WFS + KaM 0/20 + BPLT + A

Sivu (2 / 2)

| TOTEUTUNEET KOEKAPPALEET ICT-KIERTOTIIVISTYKSEN JÄLKEEN | | | | | | | | |
|---|------------|----------------|--|--------------------------|--|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Koekappaleen halkaisija Φ [mm] | | | | 100 | (ICT sylinterin halkaisija oletuksena) | | | |
| | Nro [#] | Massa m [g] | ICT vuodon massa (vesi+h.a.) [g] | ICT Korkeus h [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm ³] | Työkierrosten lukumäärä [N] | Tiiviys- aste arvio DOC [%] |
| VALMISTUS PVM. | 1 | 2134,4 | 0 | 120 | 942478 | 2,265 | 66 | 96,0 |
| | 2 | 2134,3 | 0 | 120 | 942478 | 2,265 | 76 | 96,0 |
| 2019-07-04 | 3 | 2135,2 | 0 | 120 | 942478 | 2,266 | 87 | 96,0 |
| VALMISTUS PVM. | 4 | 2132,7 | 0 | 120 | 942478 | 2,263 | 77 | 95,9 |
| | 5 | 2132,9 | 0 | 120 | 942478 | 2,263 | 69 | 95,9 |
| 2019-07-02 | 6 | 2134,9 | 0 | 120 | 942478 | 2,265 | 67 | 96,0 |
| VALMISTUS PVM. | 7 | 2132,6 | 0 | 120 | 942478 | 2,263 | 154 | 95,9 |
| | 8 | 2134,3 | 0 | 120 | 942478 | 2,265 | 139 | 96,0 |
| 2019-07-03 | 9 | 2133,6 | 0 | 120 | 942478 | 2,264 | 106 | 96,0 |

| PURISTUSLUJUUS (UCS) | | | | 7 | d | TUNNUS: WFS+KaM0-20+BPLTA-1 | | |
|----------------------|------------|----------------|---------------------------------|---|----------------------------------|---|----------------------------|-----------------|
| | Nro [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Märkä- tiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus [MPa] |
| PURISTUS PVM. | 1 | 2145,31 | 120,39 | 100,44 | 953880 | 2,2490 | 26,53 | 3,348 |
| | 2 | 2145,6 | 120,45 | 100,29 | 951507 | 2,2549 | 27,83 | 3,523 |
| 2019-07-11 | 3 | 2145,23 | 120,09 | 100,45 | 951692 | 2,2541 | 28,69 | 3,620 |
| | KA. | | | | | | | 3,497 |
| | STD. | | | | | | | 0,14 |
| | COV. | | | | | | | 3,94 % |

| PURISTUSLUJUUS (UCS) | | | | 28 | d | TUNNUS: WFS+KaM0-20+BPLTA-1 | | |
|----------------------|------------|----------------|---------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------|
| | Nro [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Tiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus [MPa] |
| PURISTUS PVM. | 4 | 2138,1 | 120,37 | 100,33 | 951634 | 2,24677 | 39,81 | 5,035 |
| | 5 | 2146,44 | 120,52 | 100,45 | 955100 | 2,24735 | 35,46 | 4,475 |
| 2019-07-30 | 6 | 2138,11 | 120,19 | 100,47 | 952864 | 2,24388 | 34,22 | 4,316 |
| | KA. | | | | | | | 4,609 |
| | STD. | | | | | | | 0,38 |
| | COV. | | | | | | | 8,20 % |

| PURISTUSLUJUUS (UCS) | | | | 84 | d | TUNNUS: WFS+KaM0-20+BPLTA-1 | | |
|----------------------|------------|----------------|---------------------------------|---|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------|
| | Nro [#] | Massa m [g] | Määritett. korkeus h [mm] | Määritett. halkaisija Φ [mm] | Tilavuus V [mm ³] | Tiheys ρ [g/cm ³] | Maksimi p.voima [kN] | Lujuus [MPa] |
| PURISTUS PVM. | 7 | | | | | | | |
| | 8 | | | | | | | |
| 2019-09-25 | 9 | | | | | | | |
| | KA. | | | | | | | |
| | STD. | | | | | | | |
| | COV. | | | | | | | |